



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

MODERNÍ METODY MOKRÉHO ČIŠTĚNÍ SPALIN

MODERN METHODS OF WET CLEANING FLUE-GAS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

BC. JAN KUBÍČEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

ING. RADEK DVOŘÁK, PH.D.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství
Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jan Kubíček
který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**
obor: **Procesní inženýrství (3909T003)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Moderní metody mokrého čištění spalin

v anglickém jazyce:

Modern methods of wet cleaning flue-gas

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

- Obeznamení se s problematikou čištění spalin ze spaloven odpadů se zaměřením na odstranění kyselých složek a těžkých kovů
- Návrh a realizace úprav stávajícího experimentálního zařízení vedoucí k jeho
- Experimentální měření dvoustupňového mokrého čištění modelových plynů s obsahem kyselých složek
- Vyhodnocení naměřených dat z experimentálního zařízení a z jednotky čištění spalin za průmyslových podmínek k získání vstupních dat pro simulační výpočty

Cíle diplomové práce:

- Výzkum podmínek, za nichž probíhá absorpce kyselých složek vznikajících při spalování odpadů.
- Dokumentace nového typu experimentálního zařízení ÚPEI pro absorpční čištění plynů v absorpční zařízení O-element (výkres)
- Zprovoznění experimentálního zařízení dvoustupňového absorpčního čištění plynů na ÚPEI.
- Výpočet tlakové ztráty experimentálního zařízení pro absorpční čištění
- Návrh metodiky měření a vyhodnocování účinnosti absorpčního odstraňování kyselých složek na experimentálním zařízení ÚPEI.
- Praktické zkoušky dvoustupňového absorpčního čištění modelových plynů s obsahem kyselých složek za proměnných podmínek absorpce (proměnné průtoky plynu a kapaliny, proměnné pH absorpčního roztoku).
- Vyhodnocení zkoušek a posouzení reprodukovatelnosti výsledků

Seznam odborné literatury:

Martin Crawford: AIR POLLUTION CONTROL THEORY, McGraw-Hill Book Co., New York, 1976

W. Strauss: INDUSTRIAL GAS CLEANING, 2nd edition, Pergamon Press, Oxford, 1975

Christopher L. Aardahl, E. James Davis: Gas/Aerosol Chemical Reactions in the NaOH-SO₂-H₂O System, Society for Applied Spectroscopy, 1996

J. L. Brave, J. A. Rocha, J. R. Fair: Mass transfer in gauze packings, Hydrocarbon Processing, 1985

J. L. Brave, J. A. Rocha, J. R. Fair: Pressure drop in structured packings, Hydrocarbon Processing, 1986

Schausberger Paul, Miltner Angela: Friedl Anton: Modelling and simulation of flue gas cleaning processes, CHISA 2008, Praha, 2008

Vedoucí diplomové práce: Ing. Radek Dvořák, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 19.11.2009

L.S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Anotace:

Hlavní náplní této diplomové práce je obeznámení se s problematikou čištění spalin ze spaloven odpadů a modernizace experimentálního zařízení zvaného „O-element“ pro odstraňování kyselých složek ze znečištěných spalin, které je instalované v laboratoři Ústavu procesního a ekologického inženýrství v Brně. Dále jsou v práci uvedeny experimentální měření na „O-elementu“ a zhodnocení naměřených dat.

Klíčová slova: čištění spalin, spalovna odpadu, absorpční kolona, orientovaná náplň, odpad, emise, oxid siřičitý, absorpce

Annotation:

The main theme of this master's thesis is to acquaint with flue gas cleaning problems. Also modernization of experimental device called “O-element”, installed in laboratory at Institute of process and environmental engineering, is involved in this master's thesis. “O-element is used for cleaning acid elements from flue gas. Further there are results of experimental measuring on this device, and their estimation

Keyword: flue gas cleaning, incineration plant, scrubber, structured packing, waste, emissions, sulphure dioxide, absorption

Bibliografická citace:

Kubíček J.: *Moderní metody mokrého čištění spalin*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2009. 57 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Radek Dvořák, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem byl seznámen s předpisy pro vypracování diplomové práce a že jsem celou diplomovou práci vypracoval samostatně.

V Brně dne 24.5 2010

Podpis.....

Poděkování:

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu své diplomové práce Ing. Radku Dvořákovi, Ph.D., a dále Ing. Davidu Jechovi, za odborné vedení a podporu při vypracování této diplomové práce.

Obsah

Úvod	12
1. Znečišťující látky vznikající při spalování odpadů	13
1.1 Perzistentní organické látky (POP)	13
1.2 Oxid uhelnatý (CO)	16
1.3 Oxid siřičitý (SO ₂)	16
1.4 Oxidy dusíku (NO _x)	17
1.5 Tuhé znečišťující látky (TZL)	19
1.6 Těžké kovy	19
1.7 Organické látky (OL)	20
1.8 Halogenovodíky	20
2. Stručný popis spalovny nebezpečného odpadu	20
3. Technologie odstraňování škodlivin	21
3.1 Řízení procesu spalování	22
3.2 Technologie snižování emisí tuhých znečišťujících látek	22
3.3 Základní metody snižování obsahu kyselých plynů	27
3.5 Technologie snižování emisí oxidů dusíku, dioxinů a furanů	33
3.6 Technologie snižování emisí rtuti a ostatních těžkých kovů	37
3.7 Snižování emisí skleníkových plynů	38
4. Legislativa a emisní limity	38
5. Praktická část	40
5.1 První stupeň čištění spalin („O – element“)	42
5.2 Druhý stupeň čištění spalin (náplňová kolona)	43
5.3 Zařízení termického zneškodňování plyných odpadů	44
5.4 Zprovoznění experimentálního zařízení	46
5.5 Měření	47
5.6 Modernizace současného zařízení	53
5.6.1. Teoretický výpočet tlakové ztráty „O-elementu“	54
6. Závěr	65
7. Použitá literatura	66
SEZNAM PŘÍLOH	69

Seznam použitých veličin

<i>Označení</i>	<i>Význam</i>	<i>Jednotka</i>
A A ₁ A ₂	plocha příčného průřezu	[m ²]
A ₃	plocha příčného průřezu	[ft ²]
A, B, C	koef. Antoinetovy rovnice	-
a, b	koeficienty Lockhart-Martiniho korelace	-
B _X B _Y	souřadnice Bakerova diagramu	-
c ₁	molární hustota	[kmol/m ³]
c _{V,rovn}	rovnovážný objemový zlomek vodní páry ve výstupních spalinách	-
c _{V,vst}	vstupní objemový zlomek vodní páry ve vstupních spalinách	-
C ₁ C ₂ C ₃	Konstanty	-
D	difuzní koeficient	[m ² /s]
d	průměr potrubí	[m]
d _{eg}	ekvivalentní průměr kanálu	[m]
d ₁	průměr potrubí	[m]
Fr	Freudovo číslo	-
g	gravitační zrychlení	[m/s ²]
g _c	stupeň konverze	-
l ₁	délka přímého úseku potrubí	[m]
MW _{H₂O}	střední molekulová hmotnost vody	[kg/kmol]
M _{odp}	hmotnost odparu z nástřiku	[kg/s]
n _{1ST}	látkové množství Stefanova proudu	[kmol/(m ² ·s)]
n ₁	látkové množství dle Fickova zákona	[kmol/(m ² ·s)]
n ₂	látkové množství inertní složky	[kmol/(m ² ·s)]
n _g	látkové množství plynu	[mol]
n _l	látkové množství kapaliny	[mol]
n _k	počet kolen	-
n	počet ramen O-elementu	-
P	celkový tlak	[Pa]
P ⁰	tlak nasycených par při výstupní teplotě spalin	[kPa]
P ₀	tlak za normálních podmínek	[Pa]
P ₁	tlak za jiných než normálních podmínek	[Pa]
P ₀₁	tlak složky 1	[Pa]
P ₀₂	tlak složky 2	[Pa]
P _{1F}	tlak složky 1 na mezifázovém rozhraní	[Pa]
P _{1I}	tlak složky 1 v jádru proudu	[Pa]
dP ₁	parciální tlak složky 1	[Pa]
ΔP	tlaková ztráta strukturované náplně	[Pa]
ΔP ₁	tlaková ztráta vstupní tvarovky O-elementu	[Pa]
ΔP ₂	tlaková ztráta centrické redukce	[Pa]
ΔP ₃	tlaková ztráta přímého úseku potrubí	[Pa]

ΔP_4	tlaková ztráta kolene	[Pa]
ΔP_5	tlaková ztráta vzniklá čelním sražením proudů	[Pa]
<i>Označení</i>	<i>Význam</i>	<i>Jednotka</i>
ΔP_{gl}	tlaková ztráta dvoufázového proudění	[Pa]
ΔP_G	tlaková ztráta samotného proudu plynu na úseku dvoufázového rozhraní	[Pa]
ΔP_L	tlaková ztráta samotné kapaliny na úseku dvoufázového rozhraní	[Pa]
ΔP_c	celková tlaková zpráva O-elementu	[Pa]
R_e	Reynoldsovo číslo	-
R_{eg}	Reynoldsovo číslo plynu	-
R_m	universální plynová konstanta	[J/(mol·K)]
s	vzdálenost od mezifázového rozhraní	[m]
T	Teplota	[°C]
T_0	teplota při normálních podmínkách	[273,15K]
T_1	teplota při jiných podmínkách než normálních	[K]
$T_{výst}$	výstupní teplota spalín z O-elementu	[°C]
U_l	rychlost kapaliny kolonou	[m/s]
U_{ge}	efektivní rychlost plynu	[m/s]
U_{gs}	rychlost plynu kolonou	[m/s]
v_1	rychlost proudění spalín na vstupu O-elementu	[m/s]
v_2	rychlost proudění spalín centrickou redukcí	[m/s]
v_3	rychlost proudění spalín přímým úsekem potrubí	[m/s]
v_M	rychlost proudění dvoufázové směsi	[m/s]
v_g	zdánlivá rychlost plynu	[m/s]
v_l	zdánlivá rychlost kapaliny	[m/s]
V_0	objemový průtok plynu za normálních podmínek	[m ³ /s]
V_1	objemový průtok plynu za jiných než normálních podmínek	[m ³ /s]
V_L	celkový objemový průtok kapaliny O-elementem	[m ³ /s]
V_g	objemový průtok spalín	[m ³ /s]
V_m	molový objem ($V_m=22,4136 \text{ m}_N^3/\text{kmol}$)	[m ³ /kmol]
V_{SS}	objemový průtok suchých spalín	[m ³ /s]
W_L	hmotnostní průtok kapaliny	[lb/hod]
W_G	hmotnostní průtok plynu	[lb/hod]
x	parametr výpočtu hustoty směsi kapalina-plyn	-
x_{Ai}	vstupní hmotnostní (molární) zlomek rozpustné složky v kapalině	-
x_{Ac}	výstupní hmotnostní (molární) zlomek rozpustné složky v kapalině	-
y_{Ac}	výstupní hmotnostní (molární) zlomek rozpustné složky plynu	-
y_{Ai}	vstupní hmotnostní (molární) zlomek rozpustné složky plynu	-
$x_{V,vst}$	vstupní relativní obsah vody vztažený na suché spaliny	-
$x_{V,výst}$	výstupní relativní obsah vody vztažený na suché	-

	spaliny	
X_{LM}	koeficient v Lockhat-Martinelliho korelaci	-
$\zeta_1 \zeta_2 \zeta_3$	ztrátové součinitele	-
λ	třecí součinitel	-
η_g	dynamická viskozita plynu	[Pa·s]
μ_g	kinematická viskozita plynu	[m ² /s]
μ_l	kinematická viskozita vody	[m ² /s]
η_L	dynamická viskozita plynu v anglosaských jednotkách	[cP]
σ_L	povrchové napětí vody	[dyn/cm]
<i>Označení</i>	<i>Význam</i>	<i>Jednotka</i>
ε	Mezerovitost	-
Φ	modul Lockhat-Martinelliho korelace	-
θ	úhel natočení kanálu výplně vůči horizontální poloze	[°]
ρ_M	hustota směsi kapalina-plyn	[kg/m ³]
ρ_l	hustota kapaliny	[kg/m ³]
ρ_g	hustota plynu	[kg/m ³]
ρ_L	hustota kapaliny v anglosaských jednotkách	[lb/ft ³]
ρ_G	hustota plynu v anglosaských jednotkách	[lb/ft ³]

Úvod

Moderní doba s sebou přináší nové problémy. Rozvoj průmyslu a obchodu zasahuje do života člověka častěji, než bylo dříve obvyklé a mnohé si žádají daň v podobě poškozování životního prostředí. V dobách kdy nebylo tolik lidí na Zemi jako dnes a neprojevovalo se v takové míře ovlivňování krajiny člověkem, si obnovu klimatu zajišťovala příroda sama svými důmyslnými mechanismy a rovnováha planety tím byla zajištěna. Stále větší měrou jsou klíčové prvky ekosystému (deštné pralesy, lesy, mokřady, louky, atd.) poškozovány a tím narušována rovnováha planety. Odpadní látky vznikající při průmyslové činnosti biologickou rovnováhu nezlepšují. Člověk si čím dál více uvědomuje svoji nezastupitelnou roli v ochraně životního prostředí. Zhoršující se klima na zemi přispívá k rozvoji zdravotních komplikací všech obyvatel planety.

Jedním z velkých problémů současnosti je nakládání s komunálním a nebezpečným odpadem. V České republice se v roce 2008 vyprodukovalo 25,87 mil. tun odpadu, z toho necelých 6 % tvoří nebezpečné odpady [1]. Z celkové produkce tvoří 3,2 mil. tun komunální odpad. Komunální odpad se likviduje převážně spalováním nebo skládkováním, částečně recyklací. Z celkového množství vyprodukovaného komunálního odpadu bylo uskladněno asi 2,3 mil. tun a 354 tis. tun spáleno. Obojí způsob likvidace má svoje výhody i nevýhody. V současnosti je přikláněno spíše ke spalování odpadů, i když s ohledem na množství produkovaného odpadu není možné veškerý odpad spalovat. Spalováním se objem odpadu minimalizuje v protikladu se skládkováním, kdy často vzniká rozsáhlý objekt skládky. Skládka v provozu, zatěžuje okolí zvýšenou prašností a zápachem, ale její založení a existence není finančně náročná jako stavba a provoz spalovny. Zlatou střední cestou je třídění odpadů a opětovné využívání surovin - recyklace. Opětovné využívání některých surovin je někdy nákladnější než jejich likvidace a výroba nových (z důvodu nedostupnosti levnější technologie), přistupuje se tedy k jejich spálení nebo skládkování. Pokud přistoupíme ke spalování odpadů, je nutné škodlivé látky obsažené ve spalínách eliminovat a využívat teplo spalín v maximální možné míře, aby dopad na ekosystém planety byl minimální.

Tato diplomová práce se mimo jiné zabývá výzkumem experimentálního zařízení na odstraňování kyselých složek ze znečištěných spalín tzv. mokrou metodou. Jedná se o dvoustupňové absorpční čištění spalín. V teoretické části jsou popsány jednotlivé znečišťující látky, jejichž množství emitované do ovzduší je kontrolováno státní legislativou. Dále jsou popsány metody k odstraňování jednotlivých látek. Praktická část popisuje experimentální zařízení, na kterém byla prováděna měření.

1. Znečišťující látky vznikající při spalování odpadů

Existuje celá řada znečišťujících látek, které při spalování odpadů vznikají. Koncentrace těchto látek se měří buď přímo na komíně zařízení, ze kterého jsou vypouštěny nebo v jeho okolí. Jsou-li koncentrace měřeny na výstupu z komína, pak se jedná o emise. Měříme-li jejich koncentraci u zemského povrchu, tam kde je dýcháme, pak jde o imise [14]. Emisní limity jsou kontrolovány státní legislativou a jejich překročení je sankcionováno vysokými pokutami. Každá z emitovaných látek má stanovenou jinou dovolenou emisní koncentraci (zákon č. 483/2008 Sb., nařízení vlády č. 354/2002 Sb., a další) [24] a [12]. Přestože se tato práce týká pouze kyselých složek, rád bych zmínil i ostatní znečišťující látky kontrolované státní legislativou, neboť i ty mají dopad na zdraví planety a celý ekosystém. Mezi nejsledovanější a zákonem hlídané škodliviny patří:

- Perzistentní organické látky (DDT, polychlorované cyklodieny, HCH, HCB, PCB, PCDD/F, PAH, Heptachlor, Toxaphen, Mirex, Chlordan) a organické látky
- oxid uhelnatý CO
- oxidy síry – SO_x (SO₂, SO₃)
- oxidy dusíku NO_x (NO, NO₂, N₂O)
- tuhé znečišťující látky (TZL)
- těžké kovy
- halogenovodíky (HF, HCl)

1.1 Perzistentní organické látky (POP)

Jedná se o skupinu toxických organických látek zvaných perzistentní organické polutanty (POP). Persistence je schopnost látky zůstat v prostředí po dlouhou dobu beze změny. Persistentní látky jsou odolné vůči chemickému, fotochemickému, termickému i biochemickému rozkladu. To umožňuje jejich koloběh v prostředí a akumulaci v půdách, sedimentech i v živých organismech. Stockholmská úmluva o persistentních organických polutantech, podepsaná ČR dne 23. května 2001, definují tyto látky následovně [7]:

- vykazují toxické vlastnosti,
- jsou persistentní,
- bioakumulují se,
- dochází u nich k dálkovému přenosu v ovzduší přesahujícímu hranice států a k depozicím,
- je u nich pravděpodobný významný škodlivý vliv na lidské zdraví nebo škodlivé účinky na životní prostředí.

Stockholmská úmluva o perzistentních organických polutantech uvádí následujících 12 látek nebo skupin látek [7]:

Pesticidy:

(zejména *insekticidy* používané na hubení škodlivého hmyzu nebo jeho vývojových stádií nebo *fungicidy* používané na hubení hub a plísní)

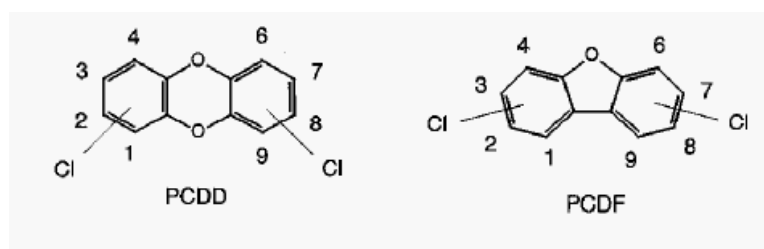
- Aldrin
- Chlornan
- DDT
- Dieldrin
- Endrin
- Mirex
- Heptachlor
- Toxafen
- Hexachlorbenzen (HCB)

Průmyslové chemikálie:

- Polychlorované bifenyly (PCBs)
- Hexachlorbenzen (HCB)

Nežádoucí vedlejší produkty:

- Polychlorované dibenzo-p-dioxiny (PCDDs) - dioxiny
- Polychlorované dibenzo-furany (PCDFs) - furany



Obr. 1: Molekulová struktura PCDD a PCDF

Základní molekulová struktura dioxinů a furanů je uvedena na obrázku 1. Dioxiny jsou trvalou součástí zemského prostředí (už tisíce let) a vznikají přírodními vlivy (požáry, sopečné erupce atd.) a lidskou činností, která zahrnuje spalovací pochody, jako jsou:

- výroba elektrické energie,
- vytápění domácností,
- doprava,
- termické zpracování odpadů, atd.

Celkem je známo 210 kongenerů lišících se:

- počtem substituovaných atomů vodíku chlorem (1 až 8),
- polohou atomů chloru na aromatických jádrech.

Toxicita byla prokázána u 17 kongenerů (193 je netoxických), přičemž toxicita jednotlivých kongenerů se značně liší. Vedle sloučenin s vysokou toxicitou lze nalézt i látky poměrně inaktivní. Proto je zavedena relativní toxicita, která se vztahuje k toxicitě 2,3,7,8-TCDD, u kterého byl zjištěn nejvyšší účinek. Relativní toxicita je uvedena v tabulce 1:

	Koeficient ekvivalentu toxicity (TE)
2,3,7,8 - tetrachlordibenzodioxin (TCDD)	1
1,2,3,7,8 - pentachlordibenzodioxin (PeCDD)	0,5
1,2,3,4,7,8 - hexachlordibenzodioxin (HxCDD)	0,1
1,2,3,7,8,9 - hexachlordibenzodioxin (HxCDD)	0,1
1,2,3,6,7,8 - hexachlordibenzodioxin (HxCDD)	0,1
1,2,3,4,6,7,8 - heptachlordibenzodioxin (HpCDD)	0,01
- oktachlordibenzodioxin (OCDD)	0,001
2,3,7,8 - tetrachlordibenzofuran (TCDF)	0,1
2,3,4,7,8 - pentachlordibenzofuran (PeCDF)	0,5
1,2,3,7,8 - pentachlordibenzofuran (PeCDF)	0,05
1,2,3,4,7,8 - hexachlordibenzofuran (HxCDF)	0,1
1,2,3,7,8,9 - hexachlordibenzofuran (HxCDF)	0,1
1,2,3,6,7,8 - hexachlordibenzofuran (HxCDF)	0,1
2,3,4,6,7,8 - hexachlordibenzofuran (HxCDF)	0,1
1,2,3,4,6,7,8 - heptachlordibenzofuran (HpCDF)	0,01
1,2,3,4,7,8,9 - heptachlordibenzofuran (HpCDF)	0,01
- oktachlordibenzofuran (OCDF)	0,001

Tab. 1: Hodnoty ekvivalentů molární toxicity PCDD a PCDF [12]

Při termickém zneškodňování odpadů se do exhalací mohou dostávat dioxiny těmito cestami:

- nedokonalým spalováním - dioxiny jsou tepelně poměrně stabilní (zhruba do teploty 900 °C) a při nízké teplotě spalování nebo nedostatečné době zdržení ve spalovacím prostoru může dojít k jejich přechodu do spalin,
- vznikem z prekurzorů tvorby dioxinů - i když nejsou dioxiny ve spalovaném materiálu obsaženy, mohou vzniknout reakcemi z určitých typů látek (např. PVC) - tzv. prekurzor,
- syntézou *de-novo* - při průchodu spalin technologickou linkou pro utilizaci tepla a čištění spalin dochází v aparátech pracujících nad teplotou 200 °C k částečné rekombinaci již rozložených dioxinů a jejich koncentrace se zvyšuje. Množství takto vzniklých dioxinů může značně přesáhnout jejich množství na vstupu do procesu spalování.

Primárním opatřením ke snížení obsahu dioxinů ve spalinách ze spalování odpadů je zabránění jejich vzniku, dodržování předepsaného složení odpadu a podmínek jeho zneškodňování tzv. 3T pravidlo (Temperature, Turbulence, Time)[4].

- temperature = teplota; exotermická reakce spalování odpadu a přídatného paliva musí poskytnout dostatek tepla, o určité teplotě, aby zápalná směs (palivo, odpad, vzduch) zničila všechny organické látky. Doporučuje se 1100 °C,
- turbulence = vzdušnost; aby došlo k co nejlepšímu spalování, musí být spalovaný odpad dobře mísen se spalovacím vzduchem, je tedy potřeba, aby reakce měla k dispozici dostatek kyslíku ve spalovací zóně,
- time = čas; doba vystavení spalovací směsi adekvátní teplotě musí být dostatečně dlouhá, aby bylo zajištěno, že i ta nejpomalejší spalovací reakce proběhla úplně.

Minimální doba, po kterou by odpad měl být dostatečné spalovací teplotě (1100 °C) vystaven, jsou dvě sekundy.

Vzhledem k mechanismu tvorby dioxinů (např. *de-novo*) však ani dokonalý spalovací proces nepotlačí tvorbu dioxinů. Musí být použita další technologická opatření pro odstranění dioxinů na úroveň, kterou stanoví platná legislativa. Dioxiny a furany se vyskytují ve spalinách ve dvou fázích: absorbovány na popílek a v plynné fázi. Jelikož je na popílek absorbována většina těchto látek, tak stupeň čistoty narůstá se stupněm odprášení spalin.

Čištění spalin od dioxinů a furanů probíhá ve fázi odstranění tuhých prachových částic a vyčištění plynu. K odstranění tuhých prachových částic se používají tkaninové filtry a elektrostatické odlučovače (ESP). Pro odstranění plynné fáze se užívá [6]:

- adsorpční metoda, při které se jako sorbent nejčastěji používají různé druhy aktivního uhlí nebo hnědouhelného polokoksu,
- injektáž sorbentu do proudu palin,
- adsorpční čištění spalin průchodem pevným ložem sorbetu.

1.2 Oxid uhelnatý (CO)

Je bezbarvý plyn bez chuti a zápachu, lehčí než vzduch a je nedráždivý. Odhady ročních antropogenních emisí oxidu uhelnatého sahají od 350 do 600 Mt [8]. Ve vodě je málo rozpustný. Je obsažen ve svítiplynu, v generátorovém a vodním plynu. Má silně redukční vlastnosti. V přírodě je přítomen v nepatrném množství v atmosféře, kde vzniká především fotolýzou oxidu uhličitého působením ultrafialového záření, jako produkt nedokonalého spalování fosilních paliv i biomasy. Při spalování odpadu vzniká jako produkt spalování, které má nedostatečný přísun kyslíku, čímž nedojde k úplné oxidaci uhlíku na CO₂. Nedokonalé spalování je způsobeno nedostatečným okysličením paliva a nedostatečnou teplotou při spalovací reakci [8].

Malé koncentrace oxidu uhelnatého, které se mohou vyskytovat i běžně v ovzduší například ve městech, mohou způsobit vážné zdravotní potíže zejména lidem trpícím kardiovaskulárními chorobami (angina pectoris). Při vyšších koncentracích, které se však v ovzduší běžně nevyskytují, je oxid uhelnatý jedovatý. Ve směsi se vzduchem, obsahující od 12,5 do 74,2 % oxidu uhelnatého, vybuchuje [14].

1.3 Oxid siřičitý (SO₂)

Jedná se o bezbarvý, štiplavě páchnoucí, jedovatý plyn, který reaguje na povrchu různých tuhých suspendovaných částic. Je jedním ze dvou oxidů síry. Snadno se rozpouští ve vodě a může být oxidován uvnitř vodních kapiček rozptýlených v ovzduší. Je nehořlavý a rozpouští se ve vodě za vzniku kyselého roztoku, přičemž jeho rozpustnost je silně závislá na teplotě [16].

Oxid siřičitý vzniká spalováním fosilních paliv obsahujících síru, dále tavením nerostných surovin obsahujících síru a při dalších průmyslových procesech jako je rafinace ropy, výroba tepelné a elektrické energie, zpracování kovů. Významným zdrojem jsou i dopravní prostředky.

Síra se v přírodě vyskytuje ve více formách-organické, síranové a pyritické. Je reaktivní, slučuje se přímo s mnoha prvky. Spalováním paliva obsahující síru vzniká oxid siřičitý SO_2 :



z něj za vyšších teplot vzniká (za nižších teplot také, ale pomaleji) oxid siřičitý SO_3 :



který se slučuje s vodou za vzniku kyseliny sírové H_2SO_4 :



Voda bývá obsažena ve spalínách ve formě páry. Vzniklá kyselina sírová snadno kondenzuje v zařízení v podobě silně koncentrované kyseliny a tím poškozuje zařízení. Silná koncentrace je důsledkem vlivu síry na snižování rosného bodu spalín.

Oxid siřičitý může způsobovat širokou škálu negativních dopadů jak na životní prostředí, tak na zdraví člověka. Během určité doby v ovzduší přechází fotochemickou nebo katalytickou reakcí na oxid siřičitý, který je hydratován vzdušnou vlhkostí na aerosol kyseliny sírové. Kyselina sírová může reagovat s alkalickými částicemi prашného aerosolu za vzniku síranu. Síran se postupně usazuje na zemský povrch nebo jsou z ovzduší vymývány srážkami. Při nedostatku alkalických částic v ovzduší dochází k okyselení srážkových vod až na $\text{pH} < 4$. Tímto způsobem oxidy síry společně s oxidy dusíku tvoří takzvané kyselé deště. Ty mohou být větrem transportovány na velké vzdálenosti a způsobit značná poškození lesních porostů i průmyslových plodin, uvolňují z půdy kovové ionty, poškozuji mikroorganismy, znehodnocují vodu a mohou způsobit úhyn ryb.

Oxidy síry byly také podstatnou příčinou vzniku tzv. smogu „londýnského typu“. Kyselé deště poškozuji stavby tím, že při delších expozicích rozpouštějí některé druhy zdiva [16].

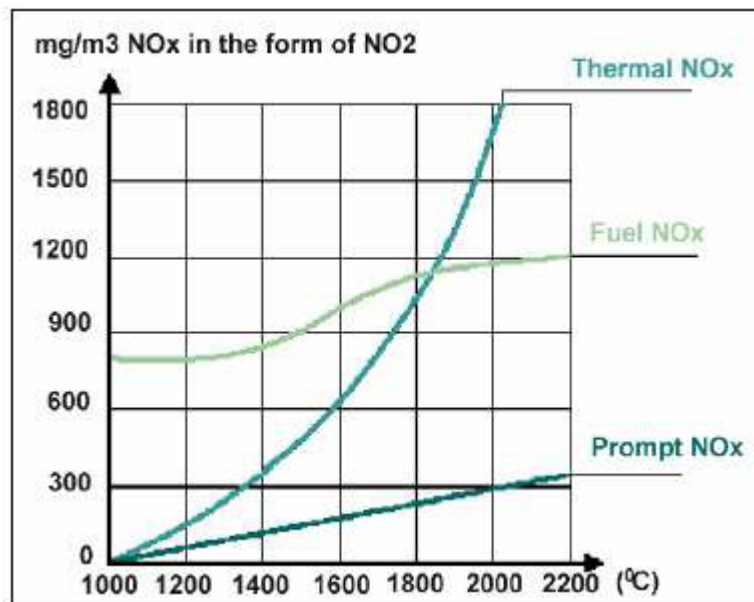
1.4 Oxidy dusíku (NO_x)

Do této skupiny patří několik druhů plynů. Nejčastěji se vyskytující jsou oxid dusnatý NO , který je bezbarvý a bez zápachu, oxid dusičitý NO_2 , který je červenohnědý, štiplavého zápachu a oxid dusný N_2O tzv. „rajský plyn“. Dále do této skupiny patří oxid dusitý N_2O_3 , tetraoxid dusíku N_2O_4 a oxid dusičitý N_2O_5 . Další oxidy dusíku se vyskytují v menších koncentracích a nepředstavují významné riziko. Oxidy dusíku vznikají třemi způsoby [9]:

Palivové NO_x - hlavním zdrojem těchto oxidů dusíku jsou paliva obsahující dusíkaté látky. Tento dusík je pak během hoření oxidován na oxidy dusíku a odchází společně s dalšími produkty hoření do ovzduší. Tento druh oxidu dusíku může tvořit až 50 % z celkové produkce oxidu dusíku při spalování lehkých topných olejů (LTO) a až 80 % při spalování uhlí. Emise lze snížit popř. vyloučit používáním bezdusíkatých paliv.

Termické NO_x - vznikají z molekul N_2 obsažených ve vzduchu, který se účastní spalování. Vlivem vysoké teploty je tento atmosférický dusík rozštěpen a s přítomnými atomy kyslíku vznikají oxidy dusíku. Jejich množství je závislé na teplotě spalování a na době zdržení ve spalovacím prostoru. Emise proto lze snížit vhodným uspořádáním spalování.

Promptní NO_x - vznikají tak, že molekulární dusík je přeměňován přes meziprodukty na NO na rozhraní plamene radikálovými reakcemi za přítomnosti uhlovodíku. Emise lze snížit obtížně, avšak jejich podíl je obvykle malý.



Obr. 2: Závislost koncentrace NO_x na teplotě pro různé mechanismy tvorby NO_x při spalování odpadů [6]

Poznámka k obrázku 2:

NO_x: *Prompt* – *promptní*, *Fuel* – *palivové*, *Thermal* - *termické*

N₂O - oxid dusný neboli „rajský plyn“ vzniká ve významnějším množství při nízkoteplotním spalování a jeho působení je významné v souvislosti se skleníkovým efektem, kde patří mezi nejvlivnější plyny, které zabraňují odrazu tepelné energie zpět od povrchu Země do vesmírného prostoru.

NO₂ - oxid dusičitý společně s kyslíkem a těkavými organickými látkami (VOC) přispívá k tvorbě přízemního ozonu a vzniku tzv. fotochemického smogu. Vysoké koncentrace přízemního ozonu poškozují živé rostliny včetně mnohých zemědělských plodin. Z oxidu dusičitého se v atmosféře tvoří kyseliny, které jsou příčinou tzv. kyselých dešťů, které se tvoří i z oxidů síry.

NO - oxid dusnatý je jedním ze skleníkových plynů. Kumuluje se v atmosféře a společně s ostatními skleníkovými plyny absorbuje infračervené záření zemského povrchu, které by jinak uniklo do vesmírného prostoru, a přispívá tak ke vzniku tzv. skleníkového efektu a následně ke globálnímu oteplování planety. Jelikož atmosférická depozice je zdrojem dusíku i pro povrchové vody, je nutné o oxidech dusíku uvažovat i jako o látkách, které se mohou přeneseně promítnout do parametru „celkový dusík“, který má vliv zejména na vznik tzv. eutrofizace vod (proces obohacování vod o živiny, zejména dusík a fosfor. Rozlišujeme přirozenou eutrofizaci, jejímž hlavním zdrojem je výplach těchto živin z půdy a rozklad mrtvých organismů a nepřirozenou, nadměrnou eutrofizaci způsobenou lidskou činností (emise zplodin, apod.). NO se v atmosféře oxidují na NO₂ a proto se emisní limit NO_x vyjadřuje jako koncentrace NO₂.

Oxidy dusíku mohou negativně působit na zdraví člověka především ve vyšších koncentracích, které se ovšem běžně v ovzduší nevyskytují [9].

1.5 Tuhé znečišťující látky (TZL)

Někdy též nazývané polétavý prach nebo atmosférický aerosol. Tvoří přirozenou součást zemské atmosféry. Jsou definovány jako soubor tuhých, kapalných nebo směsných částic o velikosti v rozsahu 1 nm – 100 μm . Významně se podílí na důležitých atmosférických dějích, jako je vznik srážek a teplotní bilance Země. Z hlediska zdravotního působení atmosférického aerosolu na člověka byly definovány velikostní skupiny aerosolu označované jako PM_x (Particulate Matter), které obsahují částice o velikosti menší než $x \mu\text{m}$. Běžně se rozlišují PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ a $\text{PM}_{1,0}$. Původ může být přirozený nebo antropogenní. Do přirozeného původu spadají výbuchy sopek, lesní požáry a prach, který se dostane díky větru do ovzduší. Mezi nejvýznamnější antropogenní zdroje patří [9]:

- vysokoteplotní procesy, především spalovací (většina spalovaného materiálu obsahuje určitý podíl popelovin),
- cementárny, vápenky, lomy a těžba,
- odnos částic větrem ze stavebních ploch a z ploch zbavených vegetace.

Tuhé znečišťující látky vzniklé spálením odpadu mohou obsahovat různá množství škodlivých látek, které se na ně absorbují při průchodu zařízením spalovny (dioxiny, furany). Mohou obsahovat i oxidy některých těžkých kovů. Ze zprávy o imisním monitoringu z roku 2007 vyplývá, že nejvíce jsou látkami PM_{10} zatíženy oblasti se silnou dopravou a oblasti s vysokým podílem průmyslové výroby. Vliv na překračování imisního limitu těchto látek má stále se zvyšující automobilová doprava [19].

1.6 Těžké kovy

Jedná se o kovy a metaloidy (nekovové prvky s některými vlastnostmi kovů) se specifikou hmotností menší než $4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Podle Světové zdravotnické organizace WHO se jedná zejména o prvky: arsen, asbest, kadmium, chrom, fluoridy, sirovodík, olovo, mangan, rtuť, nikl, platina, vanad a jiné. V emisích se mohou vyskytovat jak v plynných tak pevných skupenstvích. V ovzduší bývají vázány na atmosférický aerosol a tím mohou dlouho setrvávat v atmosféře a být transportovány na velké vzdálenosti. Ve stopových koncentracích jsou škodlivé [14].

Těžké kovy mají svůj původ převážně ve spalování fosilních paliv, odpadů a biomasy. Dalšími zdroji jsou používání benzínu s obsahem tetraethylolova, metalurgie a sklářství. Vliv těžkých kovů na kvalitu ovzduší je nepatrný. K překročení emisních limitů dochází zřídka a většinou jen lokálně. Nebezpečí těžkých kovů spočívá spíše v jejich možném přechodu a akumulaci v jiných složkách životního prostředí (zejména v půdě a rostlinách). Ke škodlivému působení z ovzduší však může dojít i v pracovním prostředí [5]. Např. spalovny nebezpečných odpadů mohou mít v pracovním prostředí vysoký obsah rtuti. Legislativou kontrolované jsou Kadmium, Thalium, Rtuť, Antimon, Arzén, Olovo, Chrom, Kobalt, Měď, Mangan, Nikl a Vanad.

1.7 Organické látky (OL)

Skupina označená organické látky zahrnuje širokou škálu škodlivých látek. Patří sem uhlovodíky a jejich nejrůznější sloučeniny, benzeny, aromatické uhlovodíky, polychlorované organické látky a zejména těkavé organické látky (VOC). Definici VOC uvádí tzv. Göteborgský protokol (Gothenburg protokol 1999) následovně [30]: „*těkavé organicky látky, neboli VOC, jsou, pokud není definováno jinak, všechny organické látky antropogenního původu, s výjimkou methanu, které jsou schopny za přítomnosti slunečního záření reagovat s oxidy dusíku za vzniku fotochemických oxidantů*“.

Vznik organických látek je malý a k zajištění emisí postačuje emisní limit oxidu uhelnatého CO [14].

1.8 Halogenovodíky

Jsou binární sloučeniny vodíku s fluorem, chromem, bromem nebo jodem. Jsou toxické a rakovinotvorné. Za běžných okolních podmínek jsou v plynném stavu:

- kyselina fluorovodíková (HF) má bod varu 19,5 °C,
- kyselina chlorovodíková (HCl) vře při 85 °C,
- kyselina bromovodíková (HBr) vře při 67 °C,
- kyselina jodovodíková (HI) vře při 36 °C.

Těkavost HF je ve srovnání s ostatními halogenovodíky abnormálně malá, protože mezi molekulami fluorovodíku HF existují velmi silné vazby vodíkovým můstkem. Jsou to velmi silné kyseliny, pronikavě páchnoucí a bezbarvé. Nejslabší kyselinou je HF, nejsilnější HI [3].

Tyto kyseliny se ve spalinách vyskytují při spalování fluorovaných, jodovaných, bromovaných nebo chlorovaných sloučenin. Emisní limit pro HCl činí 10 mg/m³ a pro HF 1 mg/m³. Emise HI a HBr nejsou zákonem regulovány [14].

2. Stručný popis spalovny nebezpečného odpadu

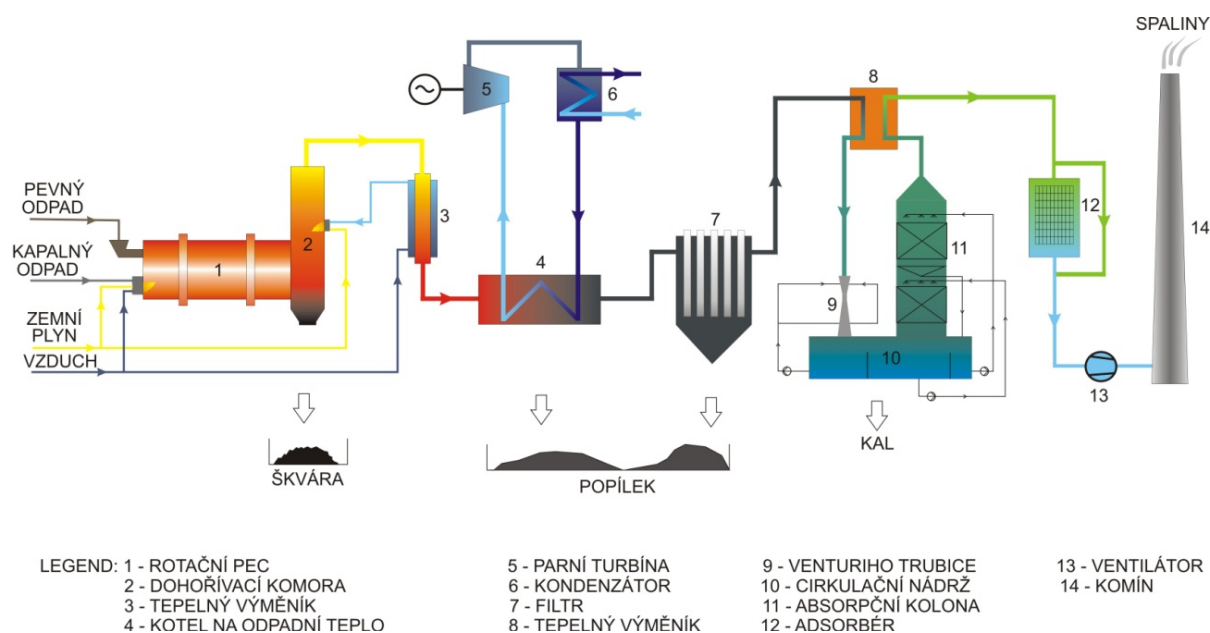
Spalovny nebezpečného odpadu zpracovávají nejčastěji odpady z průmyslové výroby a jiných oblastí, kde produkovaný odpad vykazuje vyšší koncentrace škodlivin, než jaké se vyskytují v běžném komunálním odpadu (TKO). Proto je na spalovny nebezpečného odpadu kladen vyšší nárok na úpravu spalin emitovaných do ovzduší.

Spalování nebezpečného (průmyslového a nemocničního) odpadu probíhá obvykle ve dvou stupních. První stupeň může být představován spalovací komorou (spalovny komunálního odpadu), častěji rotační pecí (spalovny nebezpečného odpadu) a druhý stupeň je prezentován dohořivací komorou. Spalovna je uzpůsobena na spalování tuhého i kapalného odpadu. Tuhý odpad se dávkuje z čela rotační pece a kapalný odpad se spaluje v hořáku. Pro stabilizaci procesu se v hořácích spaluje přídavné plynné palivo (nejčastěji zemní plyn) s potřebným přebytkem vzduchu. Teplota uvnitř rotační pece (850 – 1300 °C) je udržována regulovaným přívodem sekundárního vzduchu. Když odpad projde celou rotační pecí, přemění se na tuhé zbytky (škváru), které jsou odváděny výpadovou komorou. Spaliny z

rotační pece vstupují do dohořivací komory, kde dochází k tepelnému rozkladu škodlivých látek (při 1100 °C), které se v rotační peci díky nízké teplotě nerozložili. Spaliny se mají v dohořivací komoře pozdržet minimálně 2 vteřiny, aby došlo k co neúčinnějšímu rozkladu škodlivin.

Proud spalin vystupující z dohořivací komory obsahuje velké množství popílku (2000 až 5000 mg/m³). Dále procházejí spaliny utilizačním kotlem na odpadní teplo (HRSG – heat recovery steam generator), kterému odevzdají převážnou část energie. Mimo filtry se nejhrubší tuhé podíly odloučí ze 2/3 v kotli, kde se od spalin přehřívá pára, která na turbíně vyrábí elektrickou energii. Ochlazené spaliny po předání tepla prochází nejčastěji elektrofiltrem, který odstraňuje jemné tuhé podíly. Elektrofiltry jsou poměrně nákladné, ale dobře odolávají tepelným výkyvům a mají dobrou účinnost.

Záchyt kyselých složek (HCl, HF a oxidů síry) i oxidů těžkých kovů a zbylých podílů tuhých látek probíhá na základě chemicko-fyzikálních postupů v aparátech mokré, polosuché vypírky (absorbery), nebo v aparátech suchého čištění spalin. Absorpční náplně čistících aparátů, které pohlcují škodliviny, jsou po nějakém čase nasyceny a je třeba je buďto vyčistit, nebo vyměnit. Některé jsou čištěny kontinuálně během provozu. Pro finální dočištění znečišťujících látek (dioxiny, furany, těžké kovy) jsou využívány adsorpční, resp. katalytické postupy. Na závěr jsou vyčištěné spaliny přes spalinový ventilátor vytaženy do komína. Obrázek 3 ukazuje schéma zapojení aparátů spalovny.



Obr. 3: Typické uspořádání aparátů spalovny nebezpečného odpadu [25]

3. Technologie odstraňování škodlivin

Technologie čištění spalin jsou založeny na různých fyzikálních, chemických a fyzikálně chemických postupech, jejichž vhodnou kombinací se docílí požadované úrovně čistoty spalin. V členských státech evropské unie a OECD (Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj) byla přijata celá soustava právních předpisů, které umožňují přechod na integrovaný systém zaměřený na prevenci znečištění životního prostředí. Tento systém uvedl dne 24. září 1996 směrnici 96/61/ES o integrované prevenci a omezování znečištění

(Integrated Pollution Prevention and Control, IPPC). V rámci tohoto procesu má na krajské úrovni docházet k porovnávání stávajících technologií s nejlepšími dostupnými technikami, tzv. BAT (Best available technology), které jsou popsány v referenčních dokumentech BREF [6].

3.1 Řízení procesu spalování

Aby bylo dosaženo co nejdokonalějšího spálení odpadu, je nutné dodržet pravidlo 3T, uvedené v kapitole o perzistentních organických látkách. Spálením paliva za dostatečně vysokých teplot, potřebné výdrži při těchto teplotách a přístupu vzduchu, se výrazně omezí tvorba VOC a dioxinů. Odpady se spalují v různých typech pecí.

Za pecí následuje dohořivací komora, kde dochází k odbourání nebezpečných látek ve spalínách, které vznikly v peci spálením odpadu. Jedná se zejména o dioxiny, které se odbourávají při teplotě nad 1000 °C. Při spalování odpadů s obsahem chloru vyšším než 1 % hm. je vyžadováno, aby teplota spalín v dohořivacím stupni (za posledním přívodem kyslíku) byla vyšší než 1100 °C, s dobou zdržení spalín minimálně 2 sekundy, jak vyžaduje Směrnice 2000/76/ES [6]. Tak dojde k úplnému odbourání organických sloučenin (např. polyaromatických uhlovodíků - PAH, PCB nebo dioxinů).

3.2 Technologie snižování emisí tuhých znečišťujících látek

Cyklón

Je jednoduchý typ zařízení k odloučení tuhých látek ze spalín. Ve spalovnách komunálních a nebezpečných odpadů se již nevyužívá, protože tam je potřeba komplexnějších metod čištění. Byl nahrazen rukávcovými filtry, které kromě odstranění prachových částic mohou odstraňovat dioxiny a furany – viz. metoda selektivní katalytická filtrace v kapitole 3.5.

Jde o zařízení válcového tvaru s kuželovým dnem. Do horní části ústí tangenciálně trubka, kterou se vhání vstupní plyn. Výstup je tvořen trubicí umístěnou v horním uzávěru válce, v jeho ose. Trubka zasahuje až do dolní části válce, podle parametrů cyklónu. Vlivem tangenciálního vstupu, dochází k rotaci plynu okolo vnitřní stěny válce, směrem dolů. Prachové částice se dostávají do kontaktu se stěnou, po níž klesají na dno a do sběrného zařízení. Plyn zbavený pevných částic odchází vertikální výstupní trubicí [14].



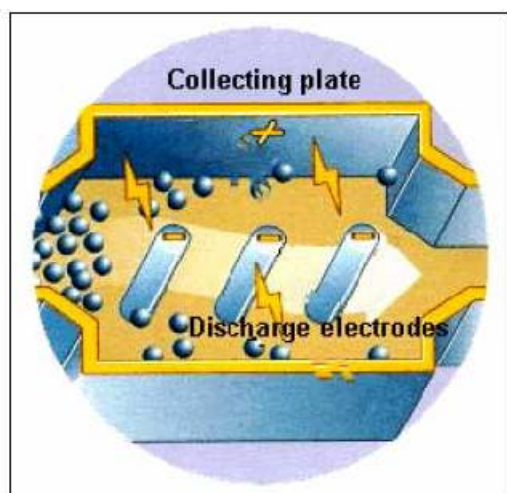
Obr. 4: Cyklón [26]

Elektrofiltr – Elektrostatický odlučovač

Jedná se o značně rozměrné zařízení na odstranění jemných prachových částic. Plyn je vháněn do komory, ve které jsou umístěny vysokonapěťové stejnosměrné elektrody. Plyn se v okolí vysokonapěťové elektrody ionizuje a tím nabíjí prachové částice plynu, které jsou přitahovány k uzemněné elektrodě, na které ulpívají. Poté jsou „oklepávány“ a dále zpracovávány.

Odlučovač by měl pracovat při teplotách menších než 250 °C. Pracuje-li při 270 °C má více než desetinásobně nižší účinnost pro zachyt dioxinů a furanů, v porovnání s látkovými filtry, pracujícími při teplotě filtrovaných plynů 160 °C.

V současné době se elektrostatické odlučovače používají hlavně k odstraňování velkých částic, neboť pro submikronové částice mají nízkou účinnost. Odlučovače náleží k finančně náročné položce v systému čištění plynů, ovšem bez aplikací dalších čistících stupňů, např. v aplikaci s adsorpčními metodami a technologií, jeho separační účinnost není dostatečná, aby mohlo být docíleno požadovaného emisního limitu [10]. Na obrázku 5 je znázorněn princip elektrofiltru a elektrofiltr v reálném procesu.



Obr. 5: Elektrostatický odlučovač [6]

Poznámka k obrázku 5:

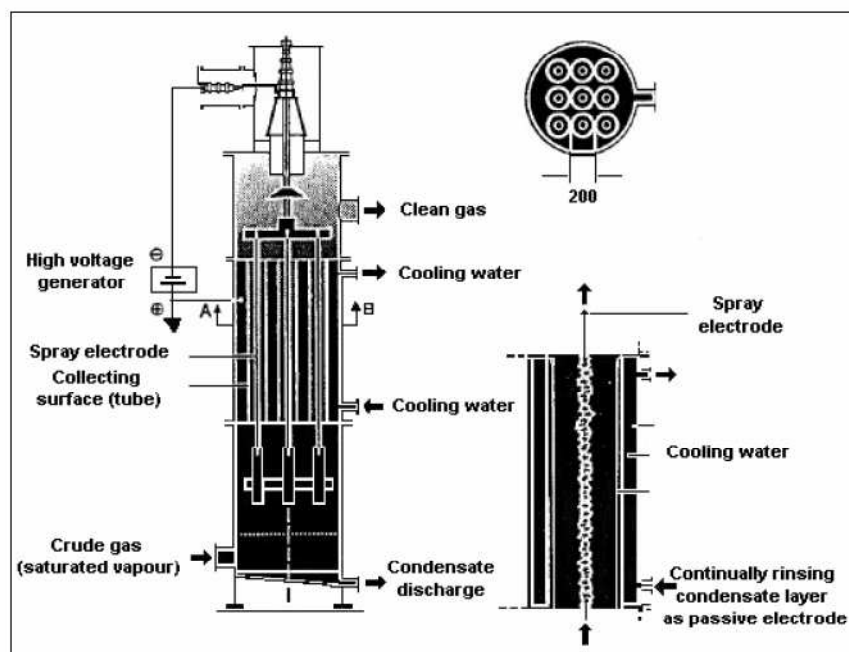
Collecting plate – shromažďovací deska, Discharge electrodes – výbojkové elektrody

Mokré elektrostatické odlučovače:

Mokré odlučovače jsou založeny na stejném technologickém principu jako ostatní elektrostatické odlučovače. Rozdíl je pouze v tom, že se popel odloučený na sběrných deskách propírá kapalinou, obvykle vodou. Propírání se provádí buď nepřetržitě, nebo periodicky. Tato technologie funguje výhodně v případech, kdy do elektrostatického odlučovače vstupuje vlhkost nebo ochlazené spaliny [6].

Kondenzační elektrostatické odlučovače:

Tento typ odlučovače je používán k odlučování velmi jemných, tuhých, kapalných nebo lepkavých částic, např. ze spalín ve spalovnách nebezpečných odpadů. Na rozdíl od konvenčních mokrých elektrostatických odlučovačů, jsou sběrné povrchy kondenzačních elektrostatických odlučovačů tvořeny vertikálními plastovými trubkami sestavenými do svazků, které se zevně chladí vodou. Spaliny, obsahující prach se nejprve zchladí na teplotu rosného bodu v šokovém chladiči pomocí přímého vstřikování vody, a poté se nasatí parou. Dalším ochlazením plynů ve sběrných trubkách se vlivem kondenzace par vytvoří tenká hladká tekutá vrstva na vnitřním povrchu trubek. Ta je elektricky uzemněna a slouží jako usazovací elektroda. Částice se usazují vlivem elektrického pole mezi jiskřícími elektrodami jako suspenze v osách trubek a kondenzační vrstvě v plynulém toku. Kondenzační vrstva současně způsobuje plynulé odstraňování usazených částic z usazovacího prostoru [6].



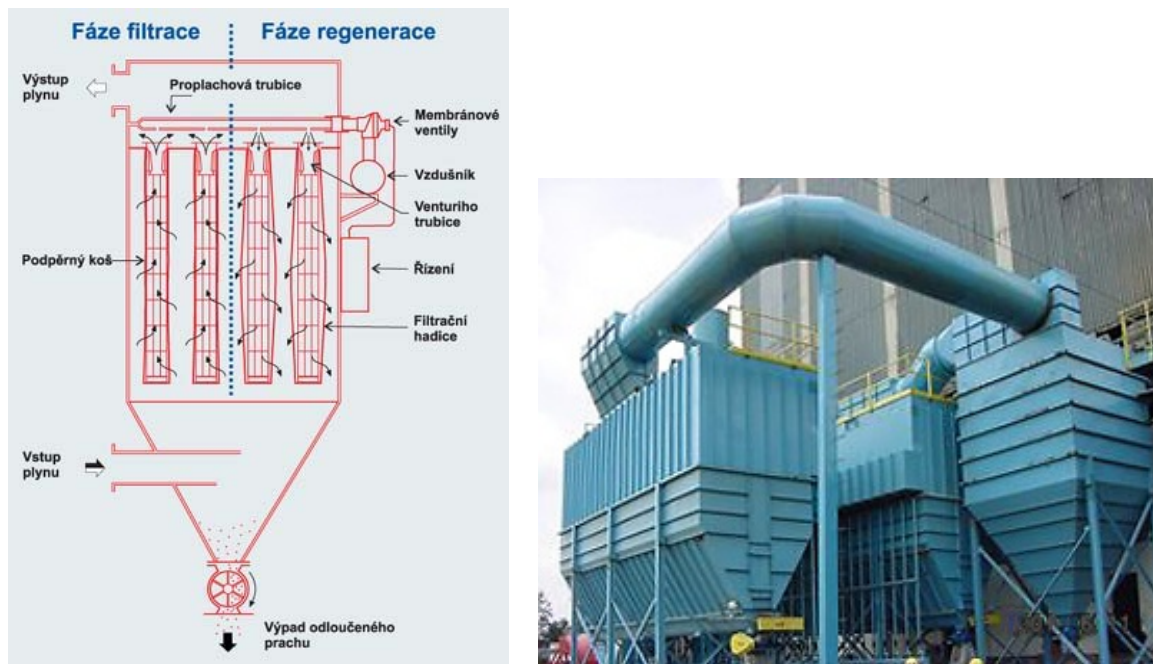
Obr. 6: Kondenzační elektrostatičtý odlučovač [6]

Poznámka k obrázku 6:

high voltage generátor – generátor vysokého napětí, spray electrode – rozprašovací elektroda, collecting surface (tube) – sběrný povrch (tuba), crude gas (saturated vapour) – surový plyn (sytá pára), clean gas – čistý plyn, cooling water – chladicí voda, condensate discharge – kondenzát z výboje, continually rinsing condensate layer as passive electrode – pasivní elektroda, ze které je průběžně vyplachován kondenzát.

Látkový filtr

Na rozdíl od elektrostatičtého odlučovače dokáže zachytit i submikronové částice. Zařízení je poměrně velké. Plyn obsahující pevné znečišťující částice vstupuje do spodní části výsypky nebo boční části skříňe látkového filtru, kde dochází vlivem poklesu rychlosti proudu plynu k prvnímu odloučení hrubých částic prachu. Znečištěný plyn dále postupuje vzhůru k svisle zavěšeným filtračním hadicím, kterými prochází do komory čistého plynu a následně vystupuje z látkového filtru. Na vnějším povrchu filtračních hadic se prachové částice zachycují a vytvářejí souvislou vrstvu prachu, která se pravidelně odstraňuje pulsní regenerací. Pulsní regenerace se provádí krátkými pulsy stlačeného vzduchu, který je vháněn do vnitřních částí hadic z otvorů proplachové trubky, přes Venturiho trubici. Účinkem pulsů stlačeného vzduchu na vnitřní stranu hadice dojde k odtržení usazené vrstvy prachu od vnějšího povrchu hadice. Prach postupně padá do výsypky a odtud je odváděn mimo prostor látkového filtru. Na základě tlakové ztráty látkového filtru nebo pevného časového režimu se řídí regenerační proces tak, aby nedocházelo k nadměrnému zvyšování tlakové ztráty a aby byla na filtračních hadicích stálá vrstva prachu, tzv. "filtrační koláč", který zvyšuje filtrační účinek látkového filtru [6]. Látkový filtr dokáže odstranit i částice označované jako $PM_{2,5}$. Vlevo na obrázku 7 je znázorněno čištění rukávců za provozu filtru.



Obr. 7: Látkový filtr [27]

Ionizační mokré pračky plynů:

Principem je kombinace elektronického filtru a náplňové absorpční kolony. Náplňová absorpční kolona je zařízení nejčastěji válcového tvaru, různé výšky, ve kterém je umístěna náplň různého druhu. Přes náplň shora protéká absorpční kapalina, která absorbuje nečistoty ze spalin proudících zespodu nahoru (viz. kapitola 3.4). Zařízení ionizačního mokrého praní plynů vyžaduje málo energie a má vysokou účinnost usazování částic menších než mikrony, i velikosti mikronů. Zařízení využívá následujících principů:

- elektrostatické nabíjení částic, elektrostatická přitažlivost a usazování aerosolových částic (menších než $5\ \mu\text{m}$),
- vertikální usazování hrubých, kapalných a pevných částic (menších než $5\ \mu\text{m}$),
- absorpce nebezpečných, korozivních a zapáchajících plynů.

Před každým stupněm náplňové věže (kolony) je nainstalována zóna vysokého napětí, která ionizuje částice (prach, aerosol, menší než $1\ \mu\text{m}$), obsažené ve spalinách. Záporně nabitě částice indukují opačné náboje na neutrálním povrchu mokrého materiálu náplně a padajících kapek vody. Díky tomu jsou přitahovány a následně vymývány v náplňovém oddíle. Tento jev se nazývá tzv. „Image Force“ přitažlivost („IF“ přitažlivost), tj. přitažlivost daná pohybem elektronů. Nebezpečné, korozivní a zapáchající plyny se absorbují ve stejném médiu absorpční kolony a chemicky sloučené jsou vypouštěny spolu s odpadními vodami z kolony.

3.3 Základní metody snižování obsahu kyselých plynů

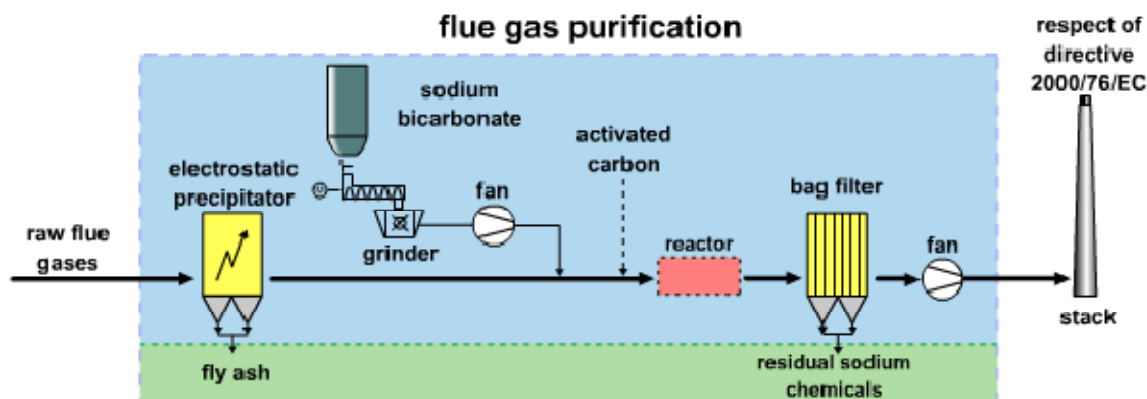
K odstraňování těchto látek (např. HCl , HF a SO_x) ze spalín se používají nejčastěji alkalická činidla, které kyseliny neutralizují. Základní rozdělení metod je následující [6]:

- suché metody – do proudu spalín se dávkuje suchý sorbent (např. vápno, uhličitán sodný). Výsledný produkt je suchý.
- polomokré metody (také nazývány polosuché) - do proudu spalín se přidává sorpční prostředek ve vodním roztoku (např. vápenné mléko) nebo v suspenzi (např. jako kal). Voda se z roztoku odpařuje a reakční produkty jsou suché. Zbytek lze recirkulovat, aby se zlepšilo využití činidla. Vedlejší jednotkou této technologie jsou *flash-dry procesy*, které spočívají ve vstřikování vody (k rychlému zchlazení plynů) a reakčního činidla do přívodu k filtru,
- mokré metody - do proudu spalín čerpána voda, peroxid vodíku nebo prací roztok obsahující část reakčního činidla (např. roztok hydroxidu sodného). Výsledný reakční produkt je kapalný.

Suché metody:

Adsorpční činidlo v podobě suchého prášku (obvykle vápno nebo uhličitán sodný), se dávkuje do proudu spalín. Je-li použito vápna, je stechiometrický poměr dvakrát až třikrát vyšší, s ohledem na usazovanou látku. Směs putuje do reaktoru, kde dojde k dostatečnému časovému pozdržení směsi, aby mohla adsorpce proběhnout. Za reaktorem následuje čištění na rukávcových filtrech. Směs se usazuje na filtrech a vytváří filtrační koláč, díky kterému reakce na filtrech dobíhá. Je tedy žádoucí usazeniny ihned neoklepávat, ale ještě určitý čas je na filtrech ponechat.

Do proudu spalín se často vstřikuje malé množství aktivního uhlí nebo hnědouhelného koksu, které navíc pomáhá pohlcovat těžké kovy, dioxiny a furany [6]. Před technologií bývá zařazen elektrofiltr, který není podmínkou. Na obrázku je schéma čištění metodou Neutrec, která používá absorbentu hydrogenuhličitanu sodného.



Obr. 8: Čištění spalín metodou Neutrec [28]

Poznámka k obrázku 8:

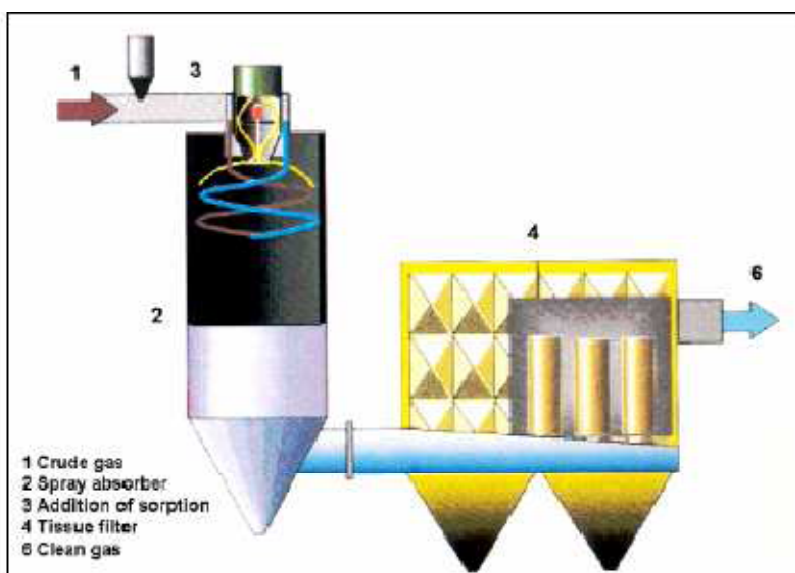
flue gas purification – čištění spalín, raw flue gases – surové plyny, electrostatic precipitator – elektrostatický odlučovač, fly ash – popílek, grinder – drtič, sodium bicarbonate – hydrogenuhličitan sodný, fan – větrák, activated carbon – aktivní uhlí, reactor – reaktor, bag filter – rukávcový filtr, residual sodium chemicals – zreagované zbytky, stack – komín, respect of directive 2000/75/EC – spaliny respektující směrnici 2000/75/EC

Suchou metodu odstraňování znečišťujících látek lze prezentovat na technologii Neutrec. Jak je z obrázku principu metody Neutrec patrné (obrázek 9), znečištěné spaliny nejdříve procházejí přes elektrofiltr, kde se odstraní prachové částice. Poté se do proudu spalín nadávkuje hydrogenuhličitan sodný a v zápětí aktivní uhlí. V reaktoru dojde k dokonalému promísení směsi se spalínami a k chemickým reakcím. Směs se zachytí na tkaninovém filtru, kde ještě dobíhají čistící reakce a nakonec jsou spaliny otaženy do komína.

Jinou, méně používanou metodou, je čištění spalín průchodem pevným ložem sorbentu. Adsorpčním prvkem je lože z lignitového koksu. Spaliny procházejí zrnitou výplní koksu z nístějové pece (HFC – Hearth Furnace Coke - jemný koks o velikosti zrn od 1,25 do 5 mm). Čistící efekt HFC je velmi závislý na mechanismech adsorpce a filtrace. Je možno odstraňovat téměř veškeré emisní složky spalín, především zbytkový obsah HCl, oxidů síry a těžkých kovů [6].

Polosuchá metoda:

Absorpční činidlo ve formě suspenze nebo roztoku se vstříkují do proudu horkých spalín v rozprašovacím reaktoru. Voda, nebo jiné použité absorpční rozpouštědlo, je vlivem horkých spalín odpařeno a vzniklé reakční produkty jsou v pevném skupenství. Takto vzniklý prach, na který jsou absorbovány škodliviny, je ze spalín odstraněn v následujícím procesu, např. rukávcovým filtrem. Tyto procesy obvykle vyžadují přebytek sorpčního činidla v poměru 1,5 až 2,5 [6].



Obr. 9: Rozprašovací absorber a rukávcový filtr [6]

Poznámka k obrázku 9:

crude gas – surový plyn, spray absorber – rozprašovací absorbér, additional of sorption – přidavky na sorpci, tissue filter – tkaninový (rukávcový) filtr, clean gas – čistý plyn

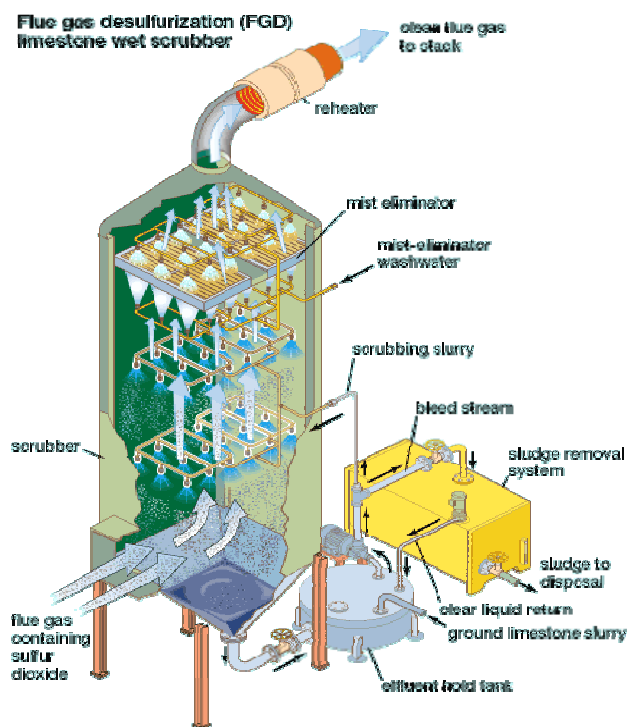
Mokré metody:

Tyto metody využívají absorpčních kolon, jichž existuje celá řada. Jsou to např.:

- tryskové absorbery
- otáčivé absorbery
- Venturi absorbery
- probublávací absorbery
- rozprašovací absorbery
- náplňové absorbery

Absorpční kolony jsou vertikální věžovitá zařízení nejčastěji kruhového průřezu. Průřez může být různý, dle požadavků technologie. Princip je založen na přestupu hmoty (difúzi), při které probíhá pohlcování znečišťující látky z plynné fáze do kapaliny. Intenzita přestupu hmoty je závislá na součiniteli přestupu hmoty, velikosti mezifázové plochy, koncentračním gradientu dané složky v plynné fázi a mezifázovém rozhraní. V mezifázové ploše dochází k přestupu látek jako je SO_2 , HF, HCl, apod. od kapaliny. Pro stejné provozní podmínky (vstupní a výstupní koncentrace absorbované složky, vlastnosti absorbentu, atd.) je množství absorbované nepřímo úměrné velikosti mezifázové plochy.

Vytvoření mezifázové plochy se děje různými způsoby. Např. náplňové absorbery obsahují různě tvarované prvky (např. Raschigovy kroužky), které mají velký specifický povrch, po kterém stéká absorpční kapalina dávkovaná v horní části nádrže. Znečištěný plyn proudí zdola nahoru. Obrázek 10 ukazuje rozprašovací absorber k odstraňování oxidů síry.



Obr. 10: Rozprašovací absorber [29]

Poznámka k obrázku 10:

flue gas desulfurization (FGD) limestone wet scrubber – odstraňování oxidů síry ze spalin vápenným absorbentem v mokrému skrubru, scrubber – absorber (skrubr), flue gas containing sulfur dioxide – spaliny s obsahem oxidu siřičitého, effluent hold tank – nádrž na odpadní kapalinu, ground limestone slurry – drcený vápenec, clean liquid return – vyčištěná kapalina vracející se do nádrže, sludge to disposal – odpadní kal k odvozu, sludge removal system – odkalovací zařízení, bleed stream – proud určený k čištění, scrubbing slurry – dávkování vápenného mléka, mist eliminator – rozptylovač mlhoviny, mist eliminator washwater – zoptýlovač mlhoviny pomocí vodní sprchy, reheater – přehřívák, clean flue gas to stack – vyčištěné spaliny do komína

Jako absorpční roztok je možné použít:

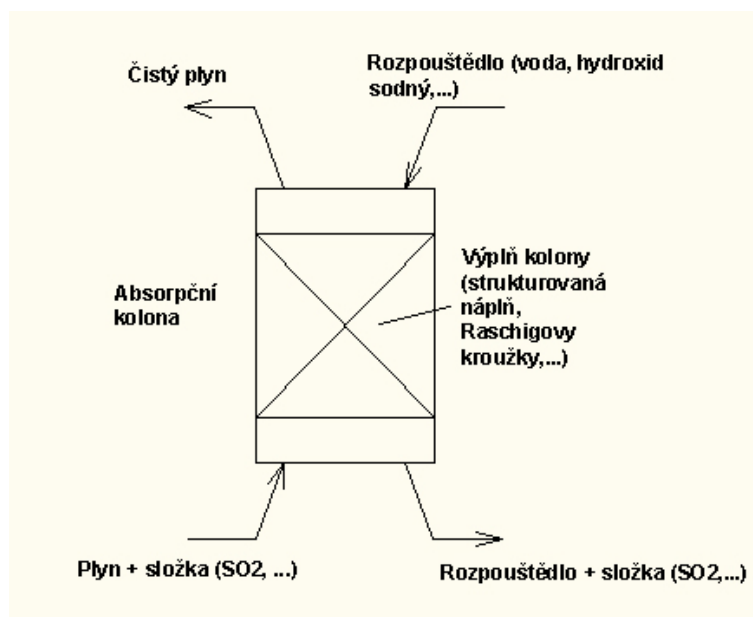
- vodu H_2O
- hydroxid sodný $NaOH$ rozpuštěný ve vodě (velmi často používaný roztok)
- hydrogenuhličitan sodný $NaHCO_3$
- hydroxid vápenatý $Ca(OH)_2$
- uhličitan vápenatý $CaCO_3$
- hydroxid manganatý $Mg(OH)_2$
- uhličitan manganatý $MgCO_3$

Absorpční roztok je po propláchnutí spalin shromažďován v cirkulační nádrži, odkud se čerpá zpět do oběhu. Část roztoku se z nádrže odvádí a nahrazuje novým roztokem, aby nedocházelo k snižování účinnosti zařízení přesycením absorpčního roztoku kyselými složkami. Tím by docházelo k snižování koncentračního spádu mezi jednotlivými fázemi. Odváděný roztok se musí před vypuštěním do kanalizace nebo opětovným použitím čistit (neutralizace, srážení těžkých kovů). Zvýšená pozornost se věnuje obsahu rtuti ve vypouštěných vodách, která se zde vyskytuje ve formě chloridu rtuťnatého ($HgCl_2$). Přidáním specifických reakčních činidel se rtuť odstraní.

V některých spalovnách se používají odpadní vody v zařízeních k šokovému chlazení spalin. Toto zařízení, umístěné za spalovacím prostorem, slouží k ochlazení spalin před vstupem do čistícího zařízení, aby nedošlo k jeho poškození vlivem vysoké teploty. Rychlé šokové zchlazení zkracuje dobu zdržení spalin v zónách vysokých teplot, které způsobují dodatečnou tvorbu PCDD/F de - novo syntézou. Ochlazování spalin se provádí intenzivním skrápěním vodou nebo odpadním roztokem a přispívá k čištění spalin od jemných prachových částic, halogenovodíků a SO_2 .

Princip absorpce

Absorpce je proces, při němž je jedna látka, obsažená v plynu, pohlcována do kapaliny pomocí kapalného rozpouštědla. Získáme tak absorbát – kapalně rozpouštědlo s pohlcenou složkou. Opačným procesem – desorpce, můžeme rozpuštěnou složku z kapaliny získat a dále využít. Obrázek 11 ukazuje schematicky princip absorpční kolony.



Obr. 11: Schematický princip absorpční kolony.

Principem absorpce je difúze – přestup hmoty z jedné fáze do druhé. Přestup hmoty se děje přes mezifázové rozhraní, na kterém se soustřeďuje odpor proti přenosu hmoty (částic).

Difúze může být ekvimolární – přes fázové rozhraní mohou složky procházet obousměrně (vyskytuje se např. u destilace), nebo jednosměrná – fázové rozhraní je propustné jen z jedné strany pro jednu složku (absorpce). U jednosměrné difúze se uplatňuje Stephanův proud, který zlepšuje přestup hmoty. Jde o proudění nepropustné složky směrem k a od fázového rozhraní. Proud sebou unáší i propustnou složku, a tím zvyšuje přestup hmoty. Přes fázové rozhraní se tedy dostávají molekuly propustné složky a navíc ještě další molekuly propustné složky, které jsou k mezifázovému rozhraní unášeny prouděním nepropustné složky – Stephanovým proudem.

Podle prvního Fickova zákona je přestup hmoty složky 1 úměrný koncentračnímu gradientu na mezifázovém rozhraní a difúznímu koeficientu. Látkové množství, které projde přes mezifázové rozhraní, určíme jako:

$$\dot{n}_1 = -D \cdot \frac{dc_1}{ds} \quad \left[\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right] \quad \{4\}$$

dc_1/ds koncentrační gradient, kde c_1 je molární hustota [kmol/m^3], s je vzdálenost od mezifázového rozhraní [m],

D difúzní koeficient [m^2/s], který lze získat měřením, výpočtem nebo z tabulek.

Pro tlak lze rovnici upravit:

$$\dot{n}_1 = -\frac{D}{R_m \cdot T} \cdot \frac{dP_1}{ds} \quad \{5\}$$

R_m	universální plynová konstanta [J/ (mol·K)],
T	teplota [°C],
dP_1	parciální tlak složky 1 [Pa].

Výsledný tok zvětšený o Stephanův proud:

$$\frac{\dot{n}_{1ST}}{\dot{n}_2} = \frac{-P_{01}}{P_{02}} \quad \{6\}$$

Potom:

$$\dot{n}_{1ST} = -\dot{n}_2 \cdot \frac{P_{01}}{P_{02}} = -\dot{n}_2 \cdot \frac{P_{01}}{P - P_{01}} \quad \{7\}$$

n_{1ST}	látkové množství přenesené prouděním Stephanova proudu, které projde jednotkovou plochou [kmol/(m ² ·s)],
n_2	látkové množství inertní složky, která neprochází přes mezifázové rozhraní (neabsorbuje se) [kmol/(m ² ·s)],
P_{01}	tlak složky 1 [Pa],
P_{02}	tlak složky 2 [Pa],
P	celkový tlak [Pa].

Celkový tok získáme součtem látkového množství, které projde přes mezifázové rozhraní a látkového množství Stephanova proudu:

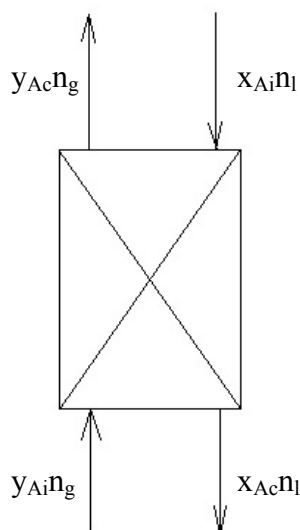
$$\dot{n}_1 = -\frac{D}{R_m \cdot T} \cdot \frac{dP_1}{ds} + \left(-\dot{n}_2 \cdot \frac{P_{01}}{P - P_{01}} \right) \quad \{8\}$$

Úpravou a integrací získáme vztah pro celkový přestup hmoty složky 1 přes mezifázové rozhraní při jednosměrné difuzi:

$$\dot{n}_1 = \frac{D \cdot P}{R_m \cdot T \cdot s} \cdot \ln \left(\frac{P - P_{1F}}{P - P_{1I}} \right) \quad \{9\}$$

P_{1F}	tlak složky 1 na mezifázovém rozhraní [Pa],
P_{1I}	tlak složky 1 v jádru proudu [Pa].

Při návrhu absorberu vycházíme z látkové bilance, která se provádí pomocí vstupních a výstupních proudů. Schéma vstupních a výstupních proudů protiproudého absorberu proudů ukazuje obrázek 12.



Obr.12: Bilanční schéma absorberu při protiproudu [32]

Pro ustálenou absorpci při protiproudu platí následující bilance [32]:

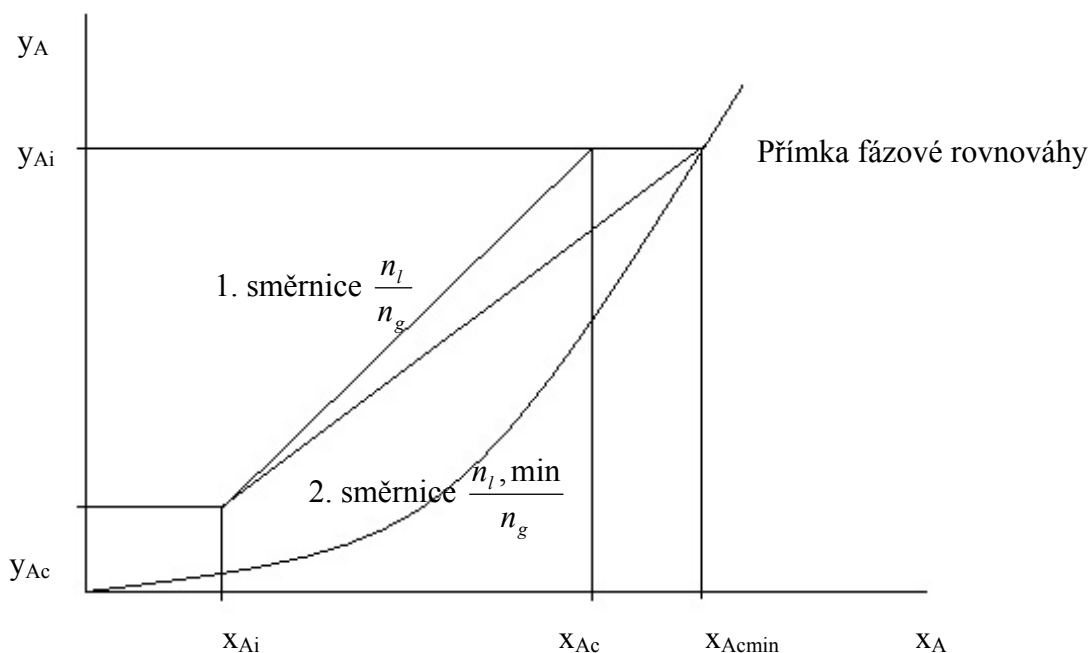
$$y_{Ai} \cdot n_g + x_{Ai} \cdot n_l = y_{Ac} \cdot n_g + x_{Ac} \cdot n_l \quad \{10\}$$

Kde:

- n_l látkové množství kapaliny ($n_l = \text{konst.}$),
- n_g látkové množství plynu ($n_g = \text{konst.}$),
- y_{Ai} vstupní hmotnostní (molární) zlomek rozpustné složky plynu,
- y_{Ac} výstupní hmotnostní (molární) zlomek rozpustné složky plynu,
- x_{Ai} vstupní hmotnostní (molární) zlomek rozpustné složky v kapalině,
- x_{Ac} výstupní hmotnostní (molární) zlomek rozpustné složky v kapalině,

Rovnici {10} lze upravit na tvar, který udává směrnici bilanční přímky na obrázku 13:

$$\frac{n_l}{n_g} = \frac{y_{Ai} - y_{Ac}}{x_{Ac} - x_{Ai}} \quad \{11\}$$



Obr. 13 Bilanční přímka [32]

2. směrnice odpovídá rovnováze koncentrace absorbované složky v obou fázích. Této přímce odpovídá minimální tok absorpčního činidla (rozpuštědla). Z ekonomického hlediska je provoz absorberu v tomto režimu optimální.

3.5 Technologie snižování emisí oxidů dusíku, dioxinů a furanů

Snižování koncentrací těchto znečišťujících látek ve spalinách se provádí na dvou úrovních. První (základní) úroveň je samotný spalovací proces v peci, kde se nastavují podmínky pro maximální možné omezení vzniku těchto znečišťujících látek. Patří sem i pravidlo 3T. Dalším stupněm je již samotné čištění spalin, které se provádí technologií selektivní katalytické redukce, selektivní nekatalytické redukce a selektivní katalytické filtrace.

Mezi základní opatření, aplikovaná při spalování v peci, patří:

- snížení přebytku vzduchu – aby nedocházelo k nadbytečné oxidaci atmosférického dusíku ze vzduchu
- omezením vysokých teplot v peci – viz. obr.2 a vznik termických NO_x

Důležitou roli hraje rovnoměrné dodávání primárního a sekundárního spalovacího vzduchu, které zabraňuje vzniku nerovnoměrného rozdělení teplot ve spalovacím prostoru, a tím vzniku NO_x . Také nadbytek spalovacího vzduchu může vést k navázání atmosférického dusíku ze vzduchu do spalin.

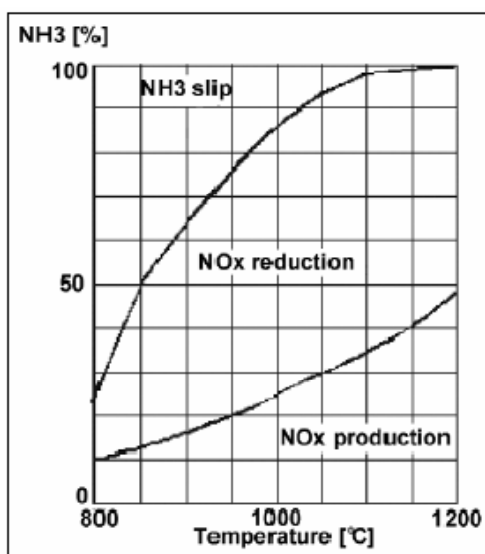
Další metody minimalizace vzniku NO_x :

- vstřikování kyslíku, čímž se eliminuje navázání atmosférického dusíku ze vzduchu;
- postupné spalování, které zahrnuje řízené dodávání a omezování vzduchu;
- vstřikování zemního plynu do prostoru pece nad roštem. Metoda zahrnuje dva postupy:
 - 1) opětovné hoření - třístupňový proces konverze NO_x na N_2 . Nad primární spalovací zónou je umístěna zóna pro opětovné spalování, kam se vstřikuje zemní plyn;
 - 2) methanová denitrifikace (DENOX) – vstřikování zemního plynu přímo do primární spalovací jednotky;
- vstřikování vody do pece resp. plamene, a tím ochlazování lokálních horkých míst;

Dalšími významnými opatřeními jsou procesy selektivní katalytické redukce (SCR) a selektivní nekatalytická redukce (SNCR).

Selektivní nekatalytická redukce (SNCR):

Principem selektivní nekatalytické redukce (SNCR) je vstřikování čpavku do spalovací komory. Reakce probíhá při teplotách mezi 850 a 1 000 °C v zónách s větší a menší reakční rychlostí. Ve více než 60-80 % případů je potřeba většího množství redukčního činidla. To způsobuje emise čpavku, také nazývané únik čpavku.



Obr. 14: Vztah mezi redukcí NO_x , tvorbou NO_x , únikem čpavku a reakční teplotou v procesu SNCR

Poznámka k obrázku 14:

NH_3 slip – únik čpavku, NO_x : production – tvorba, reduction - redukce

Z obrázku je patrné, že se zvyšující se teplotou roste redukce NO_x , ale také se zvyšuje jejich produkce vlivem oxidace čpavku. Vlivem změn teplot ve spalovací komoře se čpavek vstřikuje v několika vrstvách. Důležité je efektivní míchání spalin s čpavkem a dostatečná doba styku plynů, aby proběhly potřebné redukční reakce. Při použití v systému mokrého čištění spalin lze přebytečný amoniak odstranit v mokrému absorberu. Amoniak z odpadních vod absorberu lze získat stripováním a vracet zpět do procesu [6].

Selektivní katalytická redukce (SCR):

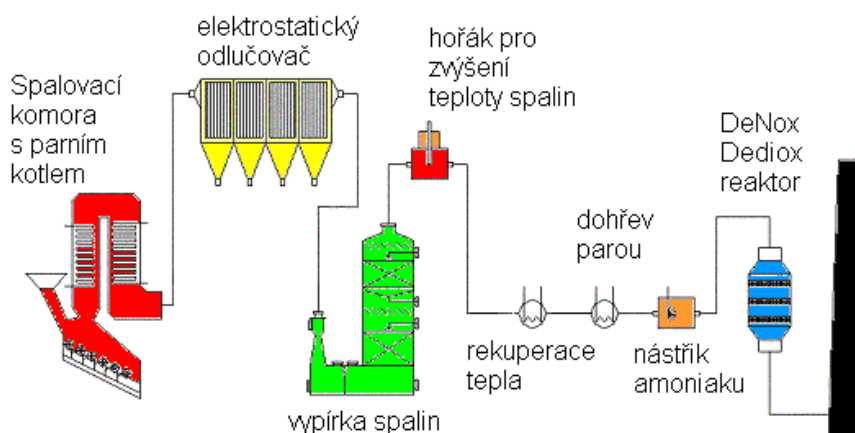
Tato metoda se užívá pro čištění NO_x i dioxinů a furanů. Jako katalyzátoru se nejčastěji používá oxidů vanadu a wolframu na nosiči oxidu titaničitého – anatasu ($\text{TiO}_2/\text{V}_2\text{O}_5$, WO_3) [31]. Čpavek, ve směsi se vzduchem, se přidává do proudu spalin, které poté procházejí katalyzátorem. Čpavek odstraňuje ze spalin NO_x podle následující reakce:



Vzniká tedy vodní pára a dusík, podobně jako u selektivní nekatalytické redukce. Na katalyzátoru probíhá následující reakce:



Katalytické čištění bývá z důvodů citlivosti katalyzátoru na katalytické jedy umístěno až za mokrou vypírkou, kde dojde k odstranění nežádoucích prachových částic a jedovatých plynů. Spaliny, které mají být vyčištěny metodou katalytické redukce, musí mít potřebnou teplotu k úspěšnému proběhnutí reakce. Tato teplota se pohybuje v rozmezí 250-380 °C, kdežto teplota spalin za mokrou vypírkou je přibližně 50 °C. Proto je nutné spaliny přehřát, což přináší značnou energetickou i finanční nákladnost [6].

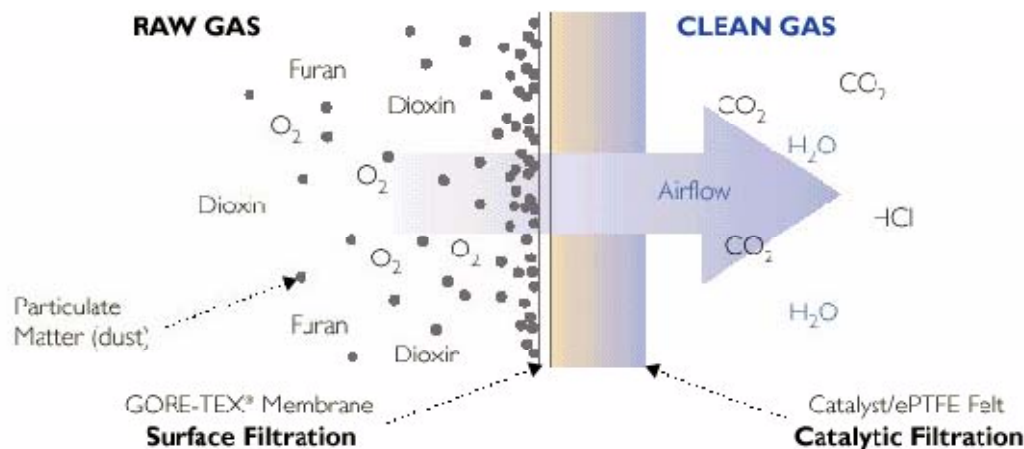


Obr. 15: Schéma spalovny s čistěním pomocí selektivní katalytické redukce (SKR)

Selektivní katalytická filtrace – odstraňování dioxinů a furanů:

Princip čištění je stejný jako u SKR s tím rozdílem, že katalyzátor je nanesen na rukávcových filtrech. Rukávce jsou vyrobeny ze speciální polytetrafluorethylenové (PTFE) tkaniny. Vnější vrstva slouží k zachycení prachových částic, obsahujících organické látky a těžké kovy. Na vnitřní plstnaté vláknité vrstvě je nanesen katalyzátor, který rozkládá organické látky (POP) na CO_2 , H_2O a HCl . Pracovní teplota katalytické filtrace se pohybuje okolo 140-260 °C. Vnitřní katalytická vrstva je chráněna před katalytickými jedy vnější

vrstvou. Filtrační plocha rukávů se periodicky regeneruje pulzním způsobem a odloučený popílek se shromažďuje ve výsypce filtru.



Obr. 16: Membrána katalytické filtrace [14]

Poznámka k obrázku 16:

raw gas - znečištěné spaliny, clean gas - čisté spaliny, particulate matter (dust) - pevné částice (prach), surface filtration - povrchová filtrace, catalyst/ePTFE Felt - katalytický substrát ve formě plsti s expandovaným polytetrafluoretylénem, catalytic filtration - katalytická filtrace, air flow - tok plynu, GORE-TEX Membrane - membrána GORE-TEX.

Životnost filtrů je předpokládána na 5 let. Pokud je použito k čištění mechanické oklepávání, je životnost snižována. Během užívání se doporučuje pravidelná laboratorní analýza, která určí stav filtru a změny katalytické aktivity, z čehož lze usuzovat na další životnosti. Katalytické filtry nedokáží zachytit rtuť. Výhodou je malá náročnost na rekonstrukci stávajícího zařízení spalovny, která spočívá ve výměně rukávů látkového filtru.

3.6 Technologie snižování emisí rtuti a ostatních těžkých kovů

Rtuť (Hg) je vysoce toxická a podobně jako olovo (Pb) se akumuluje v lidském těle, kde poškozuje lidské orgány a její vyloučení z těla je velmi pomalé. Emisní limit pro spalování odpadů je 0,05 mg/m³. Bez dodatečných opatření je obtížné limit dodržet. Důležitá je prevence vniknutí rtuti do odpadu, prováděná:

- účinným odděleným sběrem odpadu, který může obsahovat těžké kovy, např. bateriové články, baterie, dentální amalgám, atd.,
- informováním původců odpadů, že rtuť nepatří do spaloven odpadů,
- kontrolou a omezením přijímaného odpadu, který je potenciálně kontaminován rtutí (rozbory vzorků odpadů, apod.),

Rtuť se ve spalinách vyskytuje v dvojí formě. Anorganická rtuť (především dvojmocná Hg²⁺, v podobě chloridu) a elementární rtuť (kovová). Každá z nich se odstraňuje jiným způsobem. Důležité je, aby při spalování odpadu s obsahem rtuti byl přítomný chlór. Ten zajistí formu rtuti ve spalinách v iontové podobě, kterou je možné odstranit v absorberu.

Množství chlóru v odpadu je nutné hlídat. Na jednu stranu je nezbytný pro odstranění rtuti, vyšší množství by ale způsobovalo vznik sloučenin chloru (PCDD/F, apod).

Je-li nutné odstraňovat rtuť v elementární formě (čistou Hg), provádí se pomocí:

- transformace na dvojmocnou rtuť přidáním oxidačních činidel a odstraněním v absorberu – odpadní vody mohou být dodány do čistíren odpadních vod se zařízením k odstraňování těžkých kovů, ve kterých se rtuť převádí na stabilnější formu (např. HgS), která je vhodnější ke konečnému odstranění,
- přímého odstraňování na aktivním uhlí obohaceném sírou, na koksu nebo na zeolitech.

Bylo zjištěno, že neutralizace oxidem siřičitým v peci po přidání vápence může snížit podíl kovové rtuti (elementární) a tím zefektivnit celkové odstranění rtuti ze spalín. Ve spalovnách komunálních a nebezpečných odpadů je za normálních provozních podmínek obsah chlóru vždy vysoký [6]. Ostatní těžké kovy se významně odlučují v technologiích na odstraňování tuhých znečišťujících látek (viz. látkové filtry) a tam kde je používáno aktivní uhlí (viz. odstraňování oxidu siřičitého a halogenů suchou metodou).

3.7 Snížení emisí skleníkových plynů

Skleníkovými plyny se v této kapitole rozumí plyny, jejichž nejvýznamnější koncentrace vzniká spalováním, tj. oxid uhličitý (CO_2) a oxid dusný (N_2O). Emise oxidu dusného N_2O ze spalování odpadů mohou vznikat:

- je - li použito nižších spalovacích teplot - teploty pod $850\text{ }^\circ\text{C}$,
- při použití SNCR ke snížení NO_2 (především v případě výběru močoviny jako reakčního činidla).

Optimální teplota pro současné snižování emisí NO_2 a produkce N_2O je v rozpětí $850 - 900\text{ }^\circ\text{C}$. Emise N_2O se snižují, pokud je v dohořovací komoře dosaženo teplot nad $900\text{ }^\circ\text{C}$, nebo použije-li se selektivní katalytické redukce (SCR). K prevenci emisí oxidu dusného se používají následující metody [6]:

- snížení dávkování reakčního činidla – optimalizací SNCR,
- optimalizace teplotního rozmezí pro injektáž činidel SNCR,
- použití metod modelování toku k optimalizaci umístění trysek pro injektáž,
- účinný návrh míchání plynu resp. reakčního činidla ve vhodných teplotních zónách,
- navržení dohořivacích zón s vyššími přebytky vzduchu (než stechiometrický poměr), aby proběhla oxidace oxidu dusného,
- použití amoniaku namísto močoviny v SNCR.

4. Legislativa a emisní limity

V České republice se na ochranu ovzduší nově vztahuje zákon 483/2008 Sb., který mění zákon 86/2002 Sb. Nařízení vlády 354/2002 Sb. stanovuje emisní limity škodlivin [12].

Emisní limity jsou považovány za splněné, jsou-li splněny podmínky dané nařízením vlády 354/2002 Sb., uvedené v § 10 (Požadavky na měření). Specifické emisní limity pro spalovny odpadu jsou uvedeny v tabulce 2.

1. Tuhé znečišťující látky celkem (TZL)	10 mg/m ³
2. Organické látky v plynné fázi vyjádřené celkovým obsahem organického uhlíku (TOC)	10 mg/m ³
3. Plynné sloučeniny chloru vyjádřené jako HCl	10 mg/m ³
4. Plynné sloučeniny fluoru vyjádřené jako HF	1 mg/m ³
5. Oxid siřičitý (SO ₂)	50 mg/m ³
6a. Oxid dusnatý a dusičitý vyjádřené jako NO ₂ pro stávající spalovny o jmenovité kapacitě nad 6 t/h a nové spalovny	200 mg/m ³
6b. Oxid dusnatý a dusičitý vyjádřené jako NO ₂ pro stávající spalovny o jmenovité kapacitě do 6 t/h	400 mg/m ³

Tab. 2: Průměrné denní hodnoty emisí

Tabulka 3 uvádí průměrné půlhodinové hodnoty emisních limitů.

	(100 %) A	(97 %) B
1. Tuhé znečišťující látky celkem (TZL)	30 mg/m ³	10 mg/m ³
2. Organické látky v plynné fázi vyjádřené obsahem celkového organického uhlíku (TOC)	20 mg/m ³	10 mg/m ³
3. Plynné sloučeniny chloru vyjádřené jako HCl	60 mg/m ³	10 mg/m ³
4. Plynné sloučeniny fluoru vyjádřené jako HF	4 mg/m ³	2 mg/m ³
5. Oxid siřičitý (SO ₂)	200 mg/m ³	50 mg/m ³
6. Oxid dusnatý a dusičitý vyjádřené jako NO ₂ pro stávající spalovny o jmenovité kapacitě nad 6 t/h a nové spalovny	400 mg/m ³	200 mg/m ³

Tab. 3: Průměrné půlhodinové hodnoty emisí

Pozn.: Spalovny jsou navrhovány podle emisních limitů v tab. 3 ve sloupci B.

Emisní limity těžkých kovů uvádí následující tabulka 4.

1. Kadmium a jeho sloučeniny	(vyjádřené obsahem Cd)	celkem
2. Thalium a jeho sloučeniny	(vyjádřené obsahem Tl)	0,05 mg/m ³
3. Rtuť a její sloučeniny	(vyjádřené obsahem Hg)	0,05 mg/m ³
4. Antimon a jeho sloučeniny	(vyjádřené obsahem Sb)	celkem 0,5 mg/m ³
5. Arzén a jeho sloučeniny	(vyjádřené obsahem As)	
6. Olovo a jeho sloučeniny	(vyjádřené obsahem Pb)	
7. Chrom a jeho sloučeniny	(vyjádřené obsahem Cr)	
8. Kobalt a jeho sloučeniny	(vyjádřené obsahem Co)	
9. Měď a její sloučeniny	(vyjádřené obsahem Cu)	
10. Mangan jeho sloučeniny	(vyjádřené obsahem Mn)	
11. Nikl a jeho sloučeniny	(vyjádřené obsahem Ni)	
12. Vanad a jeho sloučeniny	(vyjádřené obsahem V)	

Tab. 4: Průměrné hodnoty během období odběru vzorků min. 30 minut a max. 8 hodin

Průměrné hodnoty zahrnují i emise příslušných těžkých kovů a jejich sloučenin v plynné fázi.

Emisní limit dioxinů a furanů z průměrných hodnot součtového obsahu polychlorovaných dibenzodioxinů a dibenzofuranů naměřených ve vzorku odebraném během období nejméně 6 hodin a nejvýše 8 hodin, v němž jsou jednotlivé složky přepočteny pomocí koeficientů ekvivalentu toxicity (viz. Tab. 1) $0,1 \text{ ng TEQ /m}^3$

Emisní limity oxidu uhelnatého (CO) ve spalínách během provozu spalovny (mimo dobu spouštění a odstavování) činí:

1. 50 mg/m^3 při stanovení průměrné denní hodnoty,
2. 150 mg/m^3 u minimálně 95 % všech stanovení průměrné desetiminutové hodnoty nebo 100 mg/m^3 u všech stanovení průměrné půlhodinové střední hodnoty provedených během každého období 24 hodin.

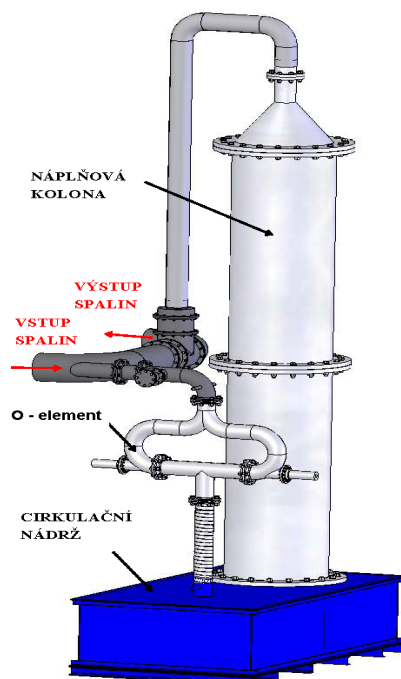
U schválené technologie fluidního spalování je přípustná průměrná hodinová hodnota nejvýše 100 mg/m^3 [12]. Ochrany ovzduší se všeobecně týkají i další zákony zahrnuté v legislativě o ochraně životního prostředí.

5. Praktická část

Na ústavu Procesního a ekologického inženýrství VUT v Brně je umístěno experimentální zařízení na mokré čištění spalín. Zařízení je nového charakteru a v praxi ještě není instalováno. Jeho výhodou je zejména menší tlaková ztráta oproti používaným aparátům, umožňující snížení provozních nákladů čistících zařízení. Bude-li prokázána jeho funkčnost a spolehlivost, je pravděpodobné, že bude v budoucnu nainstalováno na některém zařízení vyžadující čištění spalín (popř. jiné vypouštěné znečištěné vzdušiny).

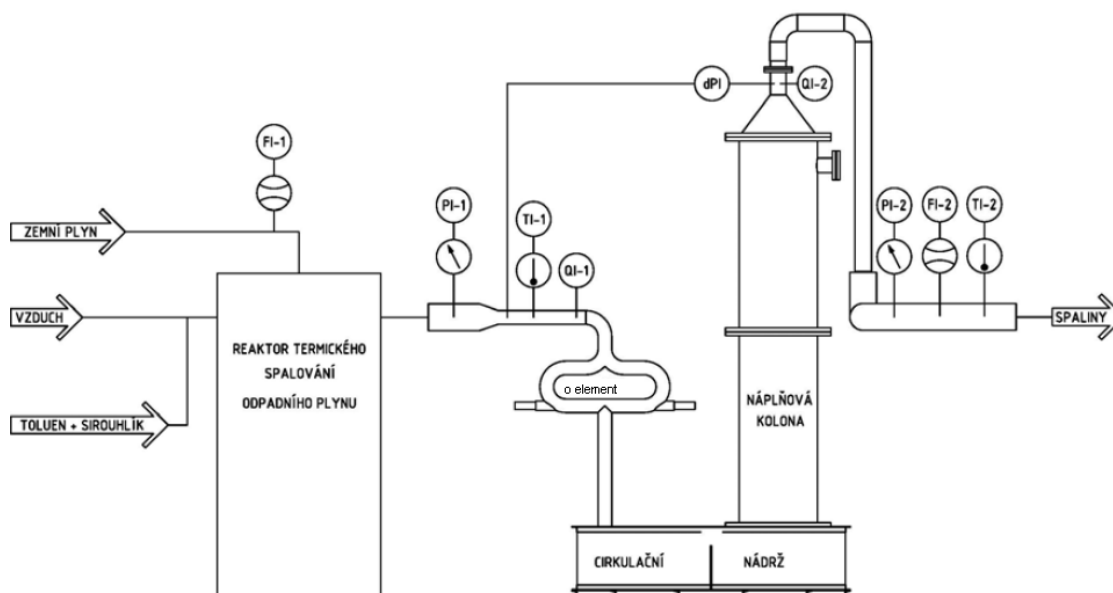
Čištění je prováděno ve dvou stupních. První stupeň je tzv. „O - element“ a druhý stupeň tvoří náplňová absorpční kolona. Zařízení je vyrobené v měřítku cca 1:100 vůči brněnské spalovně komunálního odpadu, která v roce 2006 energeticky využila 88 976 tun odpadu [13].

První stupeň experimentálního zařízení tj. O – element, je v celokovovém provedení z důvodu průchodu horkých spalín. Druhý stupeň, tj. absorpční kolona a její náplň jsou vyrobeny z polypropylenu, jelikož jí procházejí ochlazené spaliny. Oba stupně jsou umístěny na cirkulační nádrži, ve které se shromažďuje absorpční roztok. K uskutečnění měření odstraňování škodlivin je nutné mít zdroj znečištění plynu. V našem případě jím byl reaktor termického zneškodňování plyných odpadů (dále jen spalovací reaktor), vyvinutý na pracovišti Ústavu procesního a ekologického inženýrství v Brně. Při měření byla sledována účinnost zařízení při odstraňování oxidu siřičitého (SO_2) při proměnných pH absorpčního roztoku. Zjednodušený pohled na zařízení ukazuje obrázek 17.



Obr. 17: Zařízení experimentálního čištění spalin [14]

Průtok spalin, zajišťují dva spalinové ventilátory. Jeden je umístěn na vstupu přívodního vzduchu do spalovacího reaktoru a druhý na výstupu z absorpční kolony, tedy před komínem. Výkon ventilátoru lze regulovat pomocí frekvenčního měniče. Zjednodušené schéma zapojení aparátů je zřejmé z obrázku 18. Celé technologické schéma je uvedené v Příloze_2. Typy nejdůležitějších měřicích prvků jsou v Příloze_3.



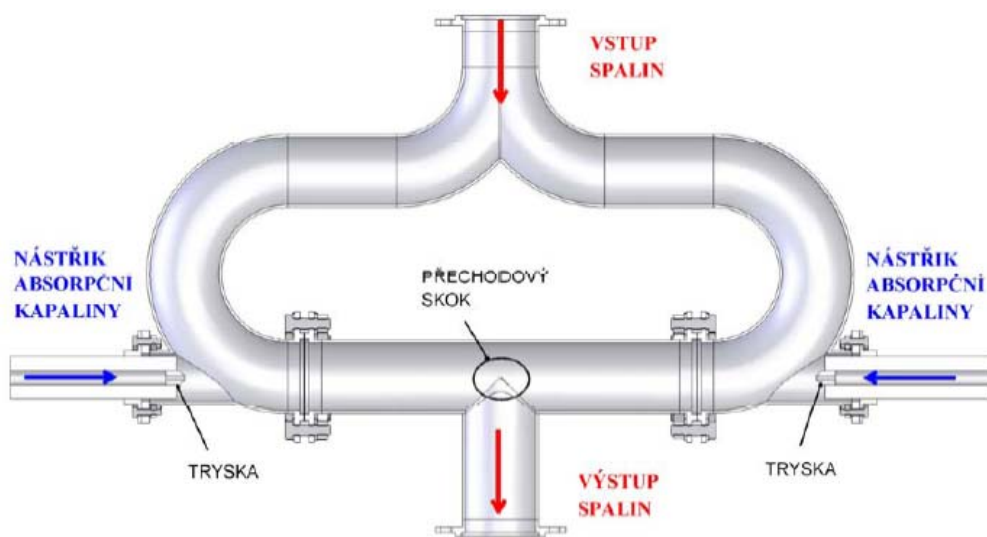
Obr. 18: Schéma zapojení aparátů experimentálního zařízení [14]

5.1 První stupeň čištění spalin („O – element“)

„O – element“ byl původně zkoušen v roce 1975 ve Výzkumném ústavu chemických zařízení Brno jako homogenizátor proudění dvoufázové směsi vzduch – voda. Bylo zjištěno, že zařízení vytváří dokonalé promísení směsi s menší talkovou ztrátou než u používané Venturiho dýzy.

Spaliny jsou z reaktoru termického zneškodňování plyných odpadů nasávány do vstupní části „O – elementu“, kde dochází k rozdělení proudění do dvou paralelních větví. Ve spodní části se tok spalin spojí a vystupuje z něj do cirkulační nádrže. Ve spodní rovné části jsou po obou stranách „O – elementu“ umístěny trysky, které vstříkují pod tlakem absorpční kapalinu do místa „přechodového skoku“. K dopravě kapaliny je použito vysokotlaké čerpadlo.

Absorpční kapalina, jejíž proudy jsou přes trysky namířeny proti sobě, vytváří v místě styku mlhovinu („přechodový skok“), díky které je vytvořena velká mezifázová plocha, ve které probíhá absorpce oxidu siřičitého do kapaliny. Jako absorpční kapalina slouží voda, jejíž pH se reguluje pomocí roztoku hydroxidu sodného (NaOH), jehož molární koncentrace je 10 mol. Tento roztok se do procesu dávkuje v místě vyústění spodního potrubí „O-elementu“ do cirkulační nádrže. V tomto místě má mlhovina se spalinami značnou rychlost a díky tomu se směs mlhoviny a dávkovaného hydroxidu sodného rozstříkne na hladině nádrže a tím se zajistí efektivní promíchání s ostatní kapalinou v nádrži. Dávkování roztoku NaOH se provádí pomocí jemného dávkování membránovým čerpadlem s kapacitou až 12 l/h. Z obrázku 19 je patrný nástřik kapaliny a místo vzniku „přechodového skoku“.



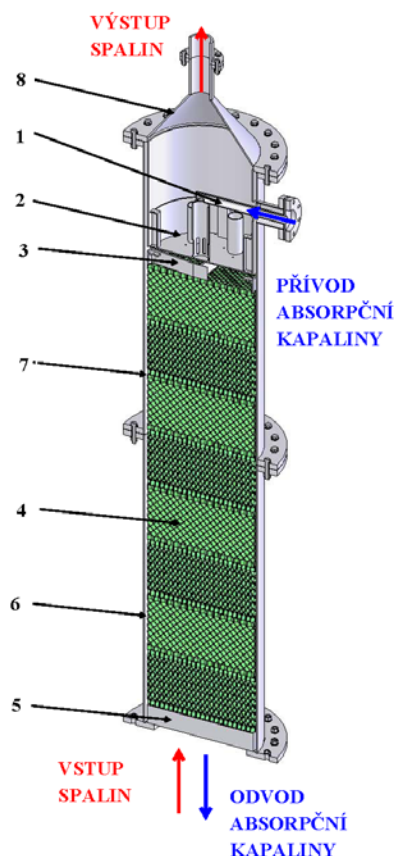
Obr. 19: Řez O – elementem s popisem proudů [14]

V potrubí, které spojuje „O – element“ s cirkulační nádrží, stále probíhá absorpční reakce. Lze očekávat, že absorpce probíhá po celé cestě spalin absorpčním zařízením, v menší míře tedy i v cirkulační nádrži tam, kde ještě spaliny nevstupují do kolony. Tlaková ztráta prvního stupně je měřena pomocí rozdílu tlaků. Jeden senzor je umístěn na vstupu spalin do „O – elementu“ a druhý za ním. Výslednou tlakovou ztrátu vyhodnocuje počítač, na který jsou senzory připojeny pomocí datapřevodníku.

5.2 Druhý stupeň čištění spalin (náplňová kolona)

Náplňová kolona, jejíž náplň dodala firma Koch-Glitsch, je vyrobena z polypropylénu včetně strukturované náplně. Kolona je přibližně 3,6 m vysoká, má průměr 600 mm a je umístěna na celokovové cirkulační nádrži. Strukturovaná náplň, která vytváří mezifázové rozhraní kapalina-pára, je typu FLEXIPAC 2Y HC. Náplň je v koloně celkem osm kusů. Podrobnější popis zařízení viz.[14].

Spaliny vyčištěné v prvním stupni, procházejí dále přes cirkulační nádrž a vstupují zespoda do druhého stupně - kolony. Vyčištěné a ochlazené spaliny vyúsťují v horní části kolony a přes ventilátor procházejí do komína. Teplota spalin na vstupu do kolony je limitována (z důvodu materiálu kolony) a neměla by přesáhnout 70 °C. Senzory k měření tlakové ztráty jsou umístěny na cirkulační nádrži a na výstupu spalin z kolony. Voda s rozpuštěným hydroxidem sodným se dávkuje z cirkulační nádrže do kolony pomocí vysokotlakého čerpadla. Obrázek 20 ukazuje vnitřní uspořádání kolony.



Obr. 20: Náplňová absorpční kolona [14]

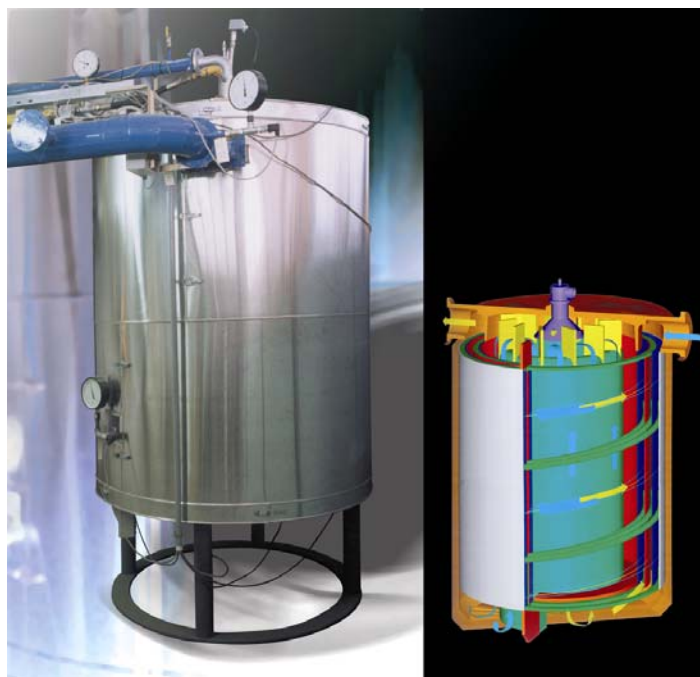
Popis obrázku 20:

1. přívodní potrubí nástřík, 2. distributor kapaliny, 3. vymezovací rošt, 4. výplň, 5. podpůrný rošt 6. spodní tubus, 7. horní tubus, 8. hlava kolony

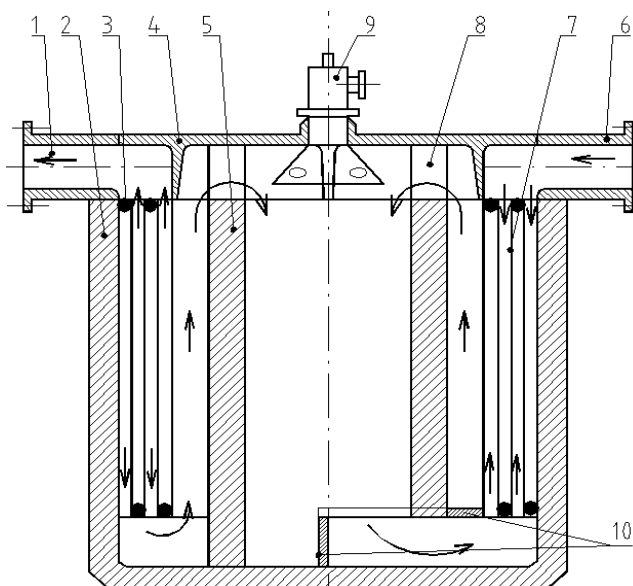
Cirkulační nádrž slouží k shromažďování absorpční kapaliny. Do nádrže je kontinuálně přiváděna čistá voda a část znečištěného roztoku je z nádrže odváděna. Čerpadlem se zajišťuje stálá cirkulace kapaliny v nádrži, aby vsřikovaný hydroxid sodný, byl dobře rozmícháván. U kapaliny v nádrži se čidlem sleduje pH roztoku a hodnoty se přes převodník vyhodnocují v počítači, s jehož pomocí lze pH roztoku nastavovat dle potřeb měření.

5.3 Zařízení termického zneškodňování plyných odpadů

Zařízení bylo vyvinuto na FSI VUT v Brně. Slouží ke zneškodňování škodlivých látek v plyných exhalacích z průmyslových výroby. Hlavním rysem reaktoru je integrace soustavy aparátů „reaktor – výměník“ do jednoho celku. Předehřev znečištěné vzdušiny zajišťuje speciální výměník složený ze soustředných válcových ploch, ve kterém proudí obě pracovní látky, tj. surový plyn (znečištěná vzdušina) a vzniklé. Tok pracovních látek v prostorech vzniklých mezi jednotlivými válcovými plochami je protiproudý. Toto uspořádání maximalizuje množství přenesené tepelné energie. Vzniklé meziválcové prostory jsou upraveny tak, že pracovní látky obtékají jednotlivé teplosměnné válce po šroubovicové trajektorii. Válcová spalovací komora, v níž probíhá vlastní proces termického čištění, je umístěna ve vnitřní části výměníku tepla v jeho axiální ose [14]. Na obrázku 21 je fotografie a 3D model reaktoru. Obrázek 22 popisuje vnitřní uspořádání zařízení.



Obr. 21: Zařízení termického zneškodňování plyných odpadů [14]



Obr. 22: Vnitřní schéma reaktoru [14]

Popis obrázku 22:

1. Výstupní komora a výstupní hrdlo spalin, 2. Vnější plášť aparátu, 3. Půlkruhové ucpávky štěrbin výměníku, 4. Víko, 5. Válcová spalovací komora, 6. Vstupní komora a vstupní hrdlo vzduchu, 7. Teplosměnné válce, 8. Lopatky vířiče, 9. Hořák, 10. Hradicí přepážka

Na vstupu vzdušiny do reaktoru je umístěno směšovací zařízení, do kterého je pomocí membránového čerpadla dávkována směs sirouhlíku (CS_2) s toluenem (C_7H_8) v poměru 1:1. Spalováním sirouhlíku vzniká škodlivý oxid siřičitý. S toluenem se sirouhlík mísí z důvodů lepšího spalování a plynulejšího dávkování čerpadlem do spalované vzdušiny.

Pro množství proudící vzdušiny $600 \text{ m}_\text{N}^3/\text{hod}$ nesoucí koncentraci 700 ppm vol. (dále jen ppm) SO_2 uvádím, jaké množství CS_2 je potřeba spálit a nadávkovat do proudu vzdušiny, abychom tuto koncentraci získali.

Nejdříve hodnotu 700 ppm přepočítám na jednotky $\text{mg}/\text{m}_\text{N}^3$:

$$X[\text{mg} / \text{m}_\text{N}^3] = X[\text{ppm}] \cdot \frac{MW_{\text{SO}_2}}{22,414} \quad \{15\}$$

kde MW_{SO_2} je molární hmotnost SO_2 ($MW_{\text{SO}_2} = 64,07 \text{ g/mol}$).

Potom:

$$X[\text{mg} / \text{m}_\text{N}^3] = 700 \cdot \frac{64,07}{22,414} = 2000,94 \text{ mg} / \text{m}_\text{N}^3 = 2,00094 \text{ g} / \text{m}_\text{N}^3 \quad \{16\}$$

Rovnice spalování sirouhlíku:



Ze stechiometrické rovnice spalování vyplývá, že spálením jedné molekuly CS₂ vzniknou dvě molekuly SO₂.

tzn:

$$\frac{m_{CS_2}}{MW_{CS_2}} = 2 \cdot \frac{m_{SO_2}}{MW_{SO_2}} \quad \{18\}$$

kde:

$$MW_{CS_2} = 76,1407 \text{ g/mol}$$

Hmotnost SO₂ vzniklého spálením 1 g CS₂ zjistíme vyjádřením z rovnice {16}:

$$m_{SO_2} = \frac{1 \cdot MW_{SO_2}}{2 \cdot MW_{CS_2}} = \frac{64,07}{2 \cdot 76,1407} = 0,421 \text{ g} \quad \{19\}$$

Kolik gramů CS₂ potřebujeme spálit k dosažení koncentrace 2,00094 g/m³ SO₂ určíme jako:

$$\frac{2,00094}{m_{SO_2}} = \frac{2,00094}{0,421} = 4,75 \text{ g} \quad \{20\}$$

K dosažení koncentrace 2,00094 g/m³ je tedy potřeba spálit 4,75 g CS₂.

Je-li průtok spalin 600 m³/h, pak k dosažení koncentrace 2,00094 g/m³ SO₂ v tomto objemu musíme spálit:

$$600 \cdot 4,75 = 2855,3 \text{ g} = 2,85 \frac{\text{kg}}{\text{hod}} \text{ CS}_2 \quad \{21\}$$

Pomocí hustoty sirouhlíku (1260 kg/m³ = 1,26 kg/dm³) přepočítáme výsledek na objem, který musíme za hodinu spálit:

$$V_{CS_2} = \frac{2,85}{\rho_{CS_2}} = \frac{2,85}{1,26} = 2,262 \text{ l/hod} \quad \{22\}$$

Pro dosažení výstupní koncentrace SO₂ 700 ppm vol. v průtoku 600 m³/hod, potřebujeme spálit 2,262 l/hod CS₂.

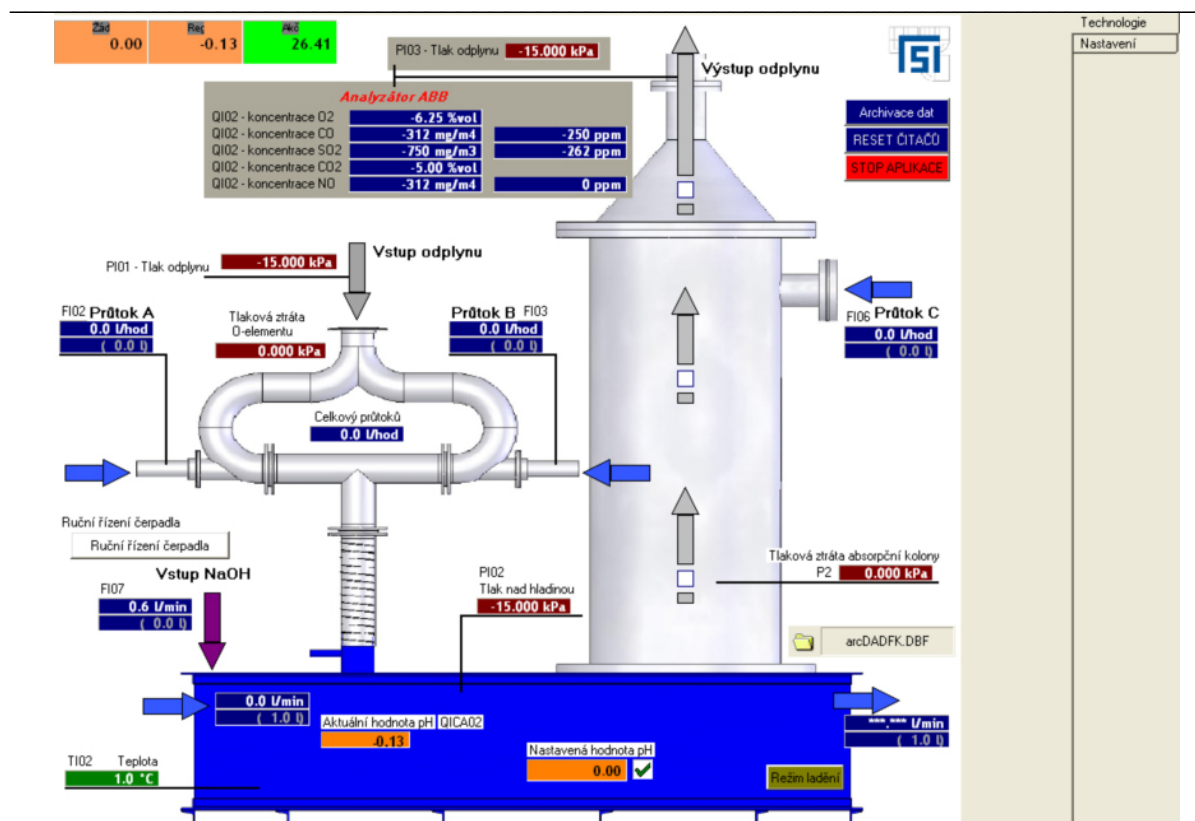
5.4 Zprovoznění experimentálního zařízení

Tato kapitola uvádí popis zprovoznění experimentálního zařízení podle technologického schématu uvedeného v Příloze 2: Technologické schéma. Popis předpokládá, že na zařízení jsou uzavřeny veškeré klapky a ventily.

- (1) Nejdříve napustíme nádrž s absorpční kapalinou na pracovní objem otevřením kulových kohoutů KK 4 a KK 5. Na boční straně nádrže sledujeme přes vodoznak stav hladiny při napouštění. Po napuštění na danou mez zregulujeme přívod a odvod kapaliny z nádrže. Otevřeme kohouty KK 8, KK 9 a KK 10. Zapneme cirkulační čerpadlo C 04. Pomocí kohoutů KK 9 a KK 4 nastavíme na průtokoměrech FI 44 a FI 45 stejné průtoky. Tím zajistíme stejný přítok a odtok do nádrže.
- (2) Nyní můžeme zprovoznit čerpadlo o „O-elementu“. Otevřeme kulové kohouty KK 11, KK 13, KK 14, KK 15 a regulační ventily RV 01 a RV 02. Čerpadlo C 01 zapneme. Nyní nám proudí kapalina do nástřiku „O-elementu“. Regulační ventily RV 01 a RV 02 nastavíme tak, aby průtokoměry FI 42 a FI 43 ukazovaly stejné průtoky. Tlakoměry PI 23 a PI 24 by měli ukazovat stejné tlaky.
- (3) Čerpadlo do náplňové kolony zprovozníme otevřením kulového kohoutu KK 6, KK 21 a regulačního ventilu RV 03. Zapneme čerpadlo C 02 a pomocí RV 03 a průtokoměru FI 21 nastavíme požadovanou hodnotu průtoku.
- (4) Až nyní můžeme zprovoznit zařízení termického zneškodňování odpadů R 01. Pokud bychom tak učinili dříve, bez dřívějšího zprovoznění cirkulace kapaliny prvním a druhým čistícím stupněm, mohli bychom zařízení poškodit vysokou teplotou proudící vzdušiny, a to zejména náplňovou kolonu, jejíž teplota by neměla přesáhnout 70 °C. Otevřeme klapky KL 01, KL 02 a KL 05. Zapneme hořák a vzduchový a spalinový ventilátor V 01 a V 02. Otáčky spalinového ventilátoru se regulují pomocí frekvenčního měniče. Zatím není potřeba, aby jel na pracovní otáčky. Zahřátí reaktoru trvá několik hodin. Po tuto dobu plynule zvyšujeme regulátorem teplotu po 100 °C za hodinu až na teplotu 600 °C.
- (5) Uvedeme do provozu analyzátory spalin AS 1 a AS 2. Jejich zahřátí trvá asi 3 hodiny. Během doby zahřívání reaktoru a analyzátorů si připravíme spalovací směs toluenu a sirouhlíku v poměru 1:1 do zásobní nádržky. Také si namícháme neutralizační směs 10-ti molového roztoku NaOH do zásobní nádržky. Připojíme počítač na datapřevodník, pomocí kterého budeme proces regulovat. Na datapřevodník jsou napojeny průtokoměry, tlakoměry, teploměry, pH – metry a čerpadlo C 05, které bude dávkovat NaOH do hlavní nádrže.
- (6) Po zahřátí reaktoru a analyzátorů můžeme přejít k měření. Před měřením zapneme čerpadlo C 05, otevřeme kohouty KK 1, KK 3 a zapneme dávkovací čerpadlo na směs sirouhlík – toluen C 03. Nyní máme celé zařízení v provozu. Pomocí frekvenčního měniče nastavíme požadovaný průtokový objem vzdušiny.

5.5 Měření

Měřením na experimentálním zařízení byla zjišťována účinnost odstraňování oxidu siřičitého ze spalin. Výstupních koncentrací se provádělo pomocí dvou analyzátorů spalin. Jeden odebíral a analyzoval vzorky na vstupu do „O – elementu“ a druhý na výstupu ze zařízení, tedy za kolonou. Data z analyzátorů byla přes datapřevodník napojena na počítač, který monitoroval celý proces. Vzhled monitorovacího softwaru je na obr. 23.



Obr. 23: Vzhled softwaru pro řízení procesu počítačem

Při měření byly nastavovány:

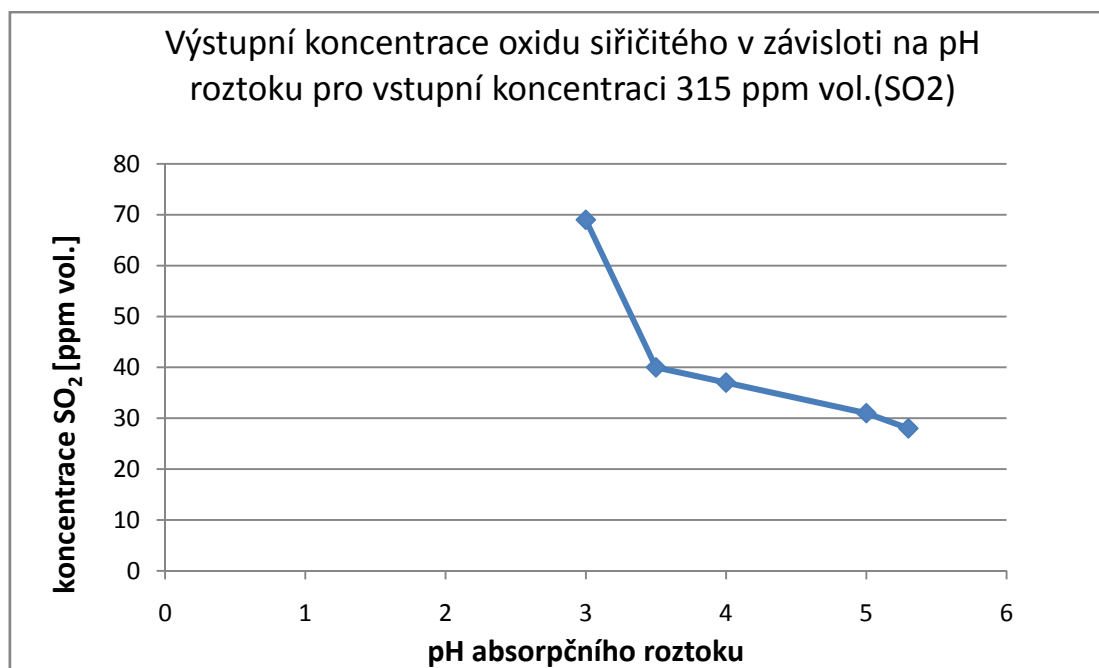
- průtoky spalin (vzdušiny) zařízením – regulovány pomocí frekvenčního měniče,
- průtoky absorpční kapaliny do „O – elementu“ – regulovány pomocí regulačních ventilů RV 01 a RV 02,
- průtoky absorpční kapaliny do náplňové kolony – regulovány pomocí regulačního ventilu RV 03,
- různé koncentrace oxidu siřičitého na vstupu – nastavovány pomocí změny průtoku směsi sirouhlíku s toluenem na čerpadle C03,
- různé hodnoty pH absorpčního roztoku v cirkulační nádrži – regulovány pomocí počítače, který ovládal čerpadlo C 05.

Při měření pro jednotlivé objemové průtoky spalin byly vždy pevně nastaveny průtoky kapaliny do prvního a druhého stupně čištění a vstupní koncentrace oxidu siřičitého. Na výstupu byla zjišťována výstupní koncentrace oxidu siřičitého ve spalinách při různém pH absorpčního roztoku. Odezva čerpadla na požadovanou změnu pH nebyla okamžitá, vždy bylo potřeba počkat, až se pH v nádrži ustálí a poté byly odečteny hodnoty výstupní koncentrace SO₂.

Výsledky měření:

Výsledky měření pro nastavení č.1:

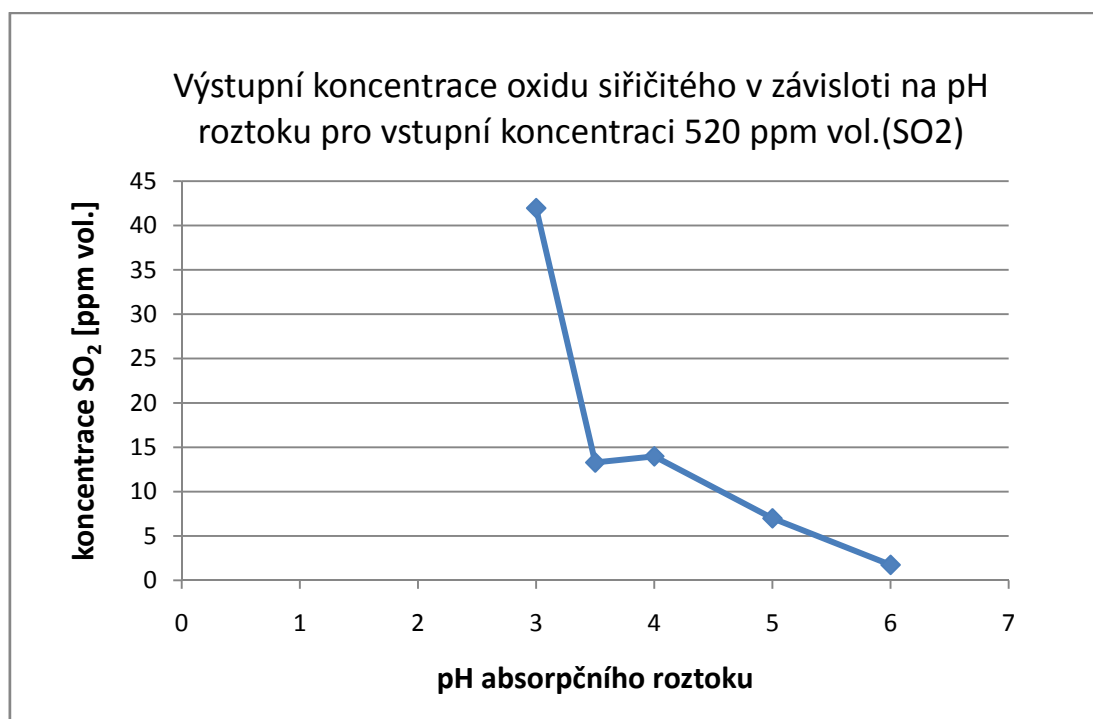
- průtok spalin $700 \text{ m}_N^3/\text{hod}$ (odpovídá frekvenci cca 44,5 Hz frekvenčního měniče),
- teplota reaktoru 550°C ,
- průtok absorpční kapaliny do kolony 3400 l/hod ,
- průtok absorpční kapaliny do „O – elementu“ 2500 l/hod (tj. 1250 l/hod do každé větve),
- koncentrace SO_2 na vstupu: 315 ppm vol.



Graf č.1: Měření pro vstupní koncentraci $315 \text{ ppm vol. SO}_2$.

Výsledky měření pro nastavení č.2:

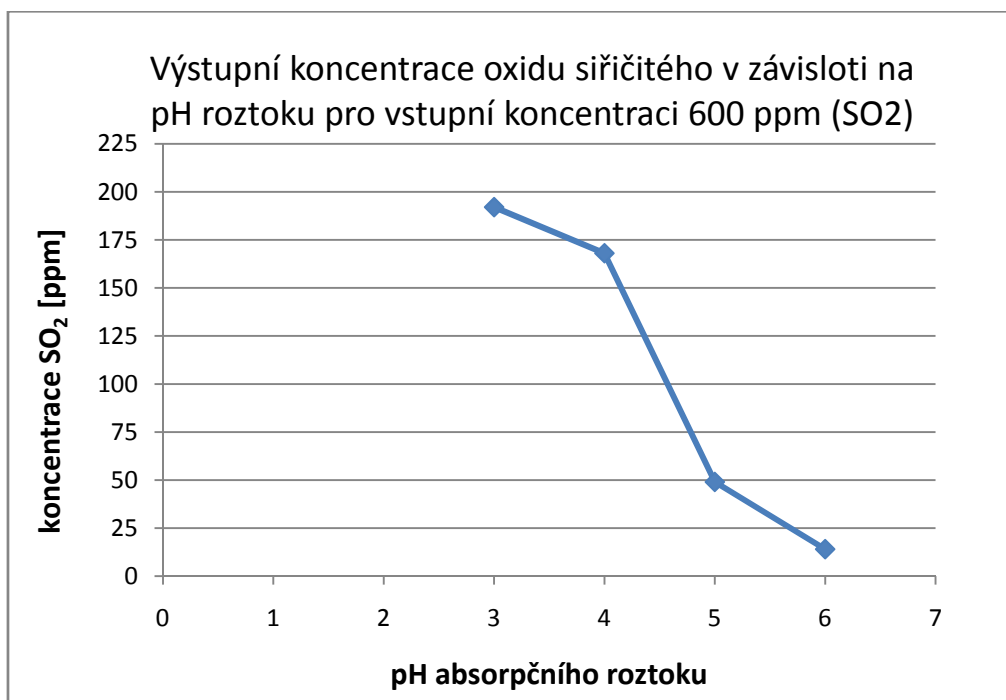
- přítok 100 l/hod čisté vody a odtok 100 l/hod z cirkulační nádrže,
- průtok spalin 600 m³/hod (odpovídá frekvenci 37,85 Hz frekvenčního měniče),
- teplota reaktoru 600 °C,
- průtok absorpční kapaliny do kolony 3780 l/hod,
- průtok absorpční kapaliny do „O – elementu“ 2520 l/hod (tj. 1260 l/hod do každé větve),
- koncentrace SO₂ na vstupu: 520 ppm vol.



Graf č.2: Měření pro vstupní koncentraci 520 ppm vol. SO₂.

Výsledky měření pro nastavení č.3:

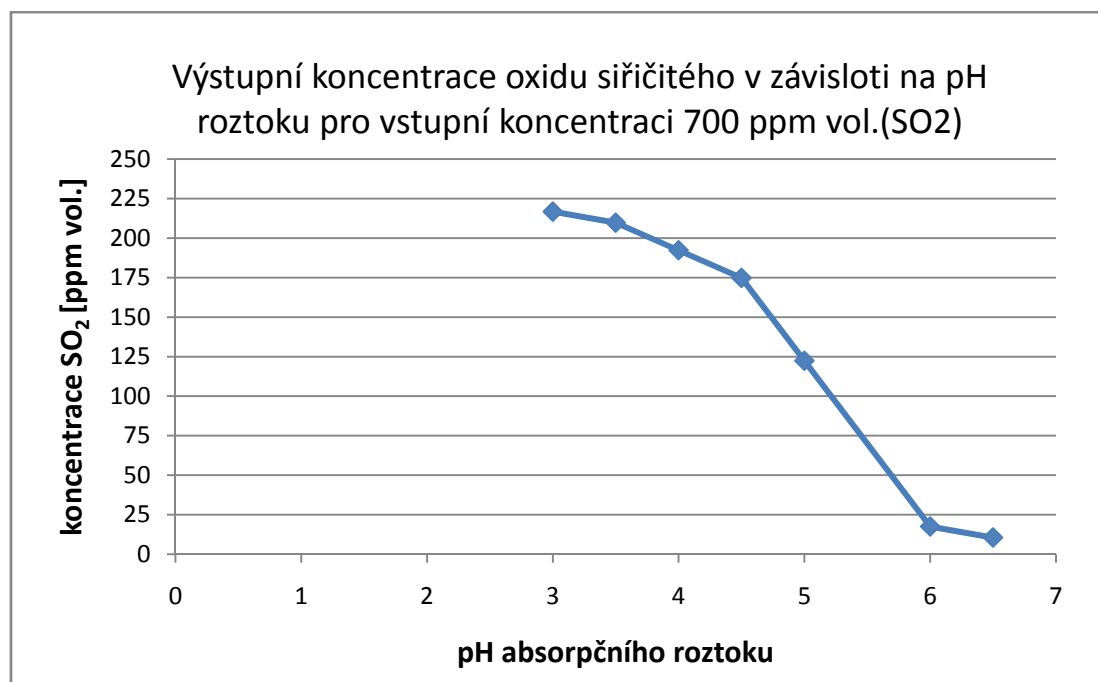
- průtok spalin $700 \text{ m}_N^3/\text{hod}$ (odpovídá frekvenci 44,5 Hz frekvenčního měniče),
- teplota reaktoru 600°C ,
- průtok absorpční kapaliny do kolony 3400 l/hod ,
- průtok absorpční kapaliny do „O – elementu“ 2500 l/hod (tj. 1250 l/hod do každé větve),
- koncentrace SO_2 na vstupu: 600 ppm vol.



Graf č.3: Měření pro vstupní koncentraci $600 \text{ ppm vol. SO}_2$.

Výsledky měření pro nastavení č.4:

- přítok 100 l/hod čisté vody a odtok 100 l/hod z cirkulační nádrže,
- průtok spalin 600 m³/hod (odpovídá frekvenci 37,85 Hz frekvenčního měniče),
- teplota reaktoru 600 °C,
- průtok absorpční kapaliny do kolony 3780 l/hod,
- průtok absorpční kapaliny do „O – elementu“ 2520 l/hod (tj. 1260 l/hod do každé větve),
- koncentrace SO₂ na vstupu: 700 ppm vol.



Graf č.4: Měření pro vstupní koncentraci 700 ppm vol. SO₂.

Zhodnocení:

Při měření byla posuzována účinnost dvoustupňového experimentálního zařízení při odstraňování oxidu siřičitého (SO₂) ze znečištěné vzdušiny. Vstupní koncentrace SO₂ do zařízení byla pro každé jednotlivé měření stejná – neměná. Měřena byla výstupní koncentrace SO₂ při různých pH absorpčního roztoku. Naměřené hodnoty ukazují grafy č.1 – 4. Na vertikální ose je výstupní koncentrace SO₂ ze zařízení jednotkách ppm. Na horizontální ose je odpovídající pH absorpčního roztoku.

Z grafů je zřejmé, že účinnost odstraňování SO₂ se zvyšuje s rostoucím pH absorpčního roztoku. Emisní limit SO₂ stanovený státní legislativou je 50 mg/m³, to je přibližně 17,5 ppm.

Graf č.1 podává nedostatečné informace, abychom mohli říci při jakém pH by byl splněn emisní limit – bylo by třeba proměřit výstupní koncentraci spalin při pH roztoku alespoň 6,5. Graf č.2 splňuje emise přibližně okolo pH 4, graf č.3 kolem pH 6,5 a poslední graf č.4 přibližně při pH 6,5. Výsledek však nelze zobecňovat, protože nastavení průtoku kapaliny do kolony nejsou u všech čtyř měření stejná a průtoky spalin také nejsou totožné. Nastavení jsou shodná u měření č.1 a č.3. A dále mají stejná nastavení měření č.2 a č.4.

U grafu č.1 lze pouze odhadnout, že by emisní limit splnil někde v rozmezí pH 6 – 6,5, pokud by přibližná přímková závislost měla stejnou klesající tendenci. Není však jasné, proč by u prvního grafu splnilo emisní limit přibližně pH 6 a u třetího také pH 6, když u třetího měření je vstupní koncentrace škodlivin téměř dvojnásobná. Měření je pravděpodobně ovlivněno chybou nakalibrování analyzátorů spalín. Je ale možné, že při dalším nárůstu pH, by koncentrace začala klesat strměji, a potřebná kyselost absorpčního roztoku pro dosažení emisního limitu by byla nižší. Toto nastavení by proto bylo potřeba ještě jednou proměřit alespoň do pH 6,5.

Měření odpovídající grafu č. 3 má spojitý průběh, bez výkyvů, hodnota emisního limitu je splněna při pH 6.

Měření odpovídající grafu č. 2 má netypický průběh. Druhý bod průběhu (při pH 3,5) by měl ležet spíše někde mezi prvním a třetím bodem. Může to být způsobené výkyvy v dávkování NaOH čerpadlem, které reaguje na hodnotu pH roztoku v nádrži nespojitě. Pokud bychom spojili první a třetí bod průběhu, emisní limit 17,5 ppm by odpovídal přibližně pH necelé 4.

Měření č. 4 má spojitý průběh, bez výkyvů. Limit spolehlivě splňuje při pH 6,5.

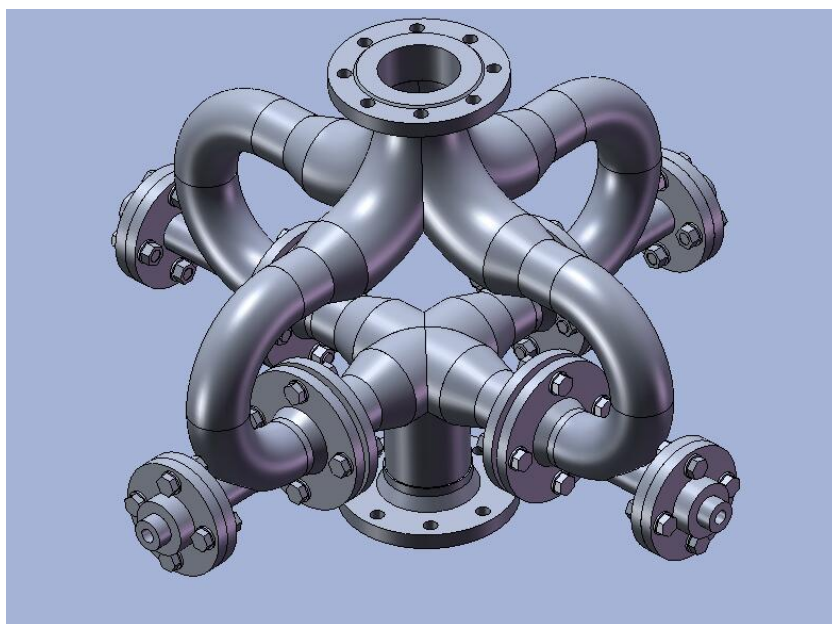
Při dodržení všech nastavení by neměl být problém naměřené výsledky opakovat. Významnou roli bude hrát nakalibrování analyzátorů spalín. S identickým nastavením průtoků by neměl být problém. Aby nedocházelo při budoucích měřeních u grafů k nespojitým průběhům, je potřeba ponechat delší časový úsek pro ustálení pH roztoku v cirkulační nádrži.

5.6 Modernizace současného zařízení

Postupným přechodem od rovinného provedení „O-elementu“ do prostorového uspořádání vznikl čtyřramenný „O-element“. Důvodem návrhu aparátu pro větší průtok spalín je, že spalovny komunálního i nebezpečného odpadu produkují běžně spaliny o průtoku v desítkách tisíc metrů krychlových za hodinu. Pro tento průtok spalín by byl původní aparát „O-element“ příliš rozměrný.

Novým prostorovým uspořádáním vznikne zařízení s křížovým půdorysem, do kterého je nastříkována absorpční kapalina ze čtyř stran jak ukazuje obrázek 22. V návrhu jsou 3 různé typy spodní části elementu. Výrobní výkresy a výkresy sestav jsou uvedeny v Příloze_1: Dokumentace nového typu experimentálního zařízení „O-elementu“. Pro sestavu uvedenou v Příloze_1 jako „Sestava celek 2“ byla vypočtena tlaková ztráta, jejíž výsledky pro průtoky 500 – 1500 m³/hod, jsou uvedeny v tabulce 5. Rozměry nového zařízení byly navrženy tak, aby respektovaly parametry stávajícího „O-elementu“, zejména rychlosti proudění plynu, aby nedocházelo k neočekávaným kolizím. Výpočet je uveden v Příloze_5: Rozměrová analýza O-elementu.

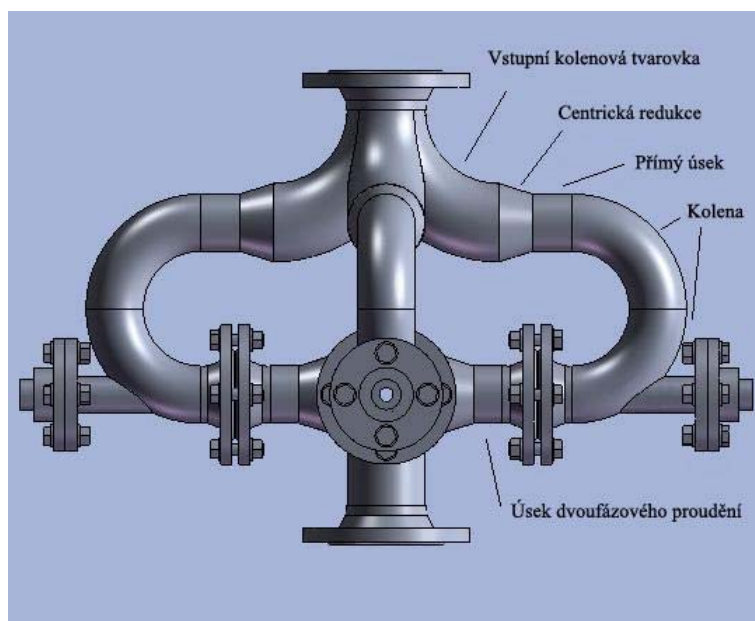
Lze očekávat, že absorpce bude probíhat nejlépe na variantě spodního celku uvedeného na obrázku 24, neboť poskytuje největší objem pro vytvoření mezifázové plochy v místě styku proudů kapaliny a spalín. Pro vytvoření maximální mezifázové plochy formou dispergované kapaliny (mlhy) je důležité, aby proudy byly pomocí trysek namířeny co nejpresněji proti sobě. Pokud by se proudy částečně míjely, kapalina by stékala po stěnách zařízení a difúze by probíhala omezeně. Proto by bylo vhodné věnovat seřízení trysek velkou pozornost.



Obr. 24: Pohled na 3D model plánovaného O-elementu

5.6.1. Teoretický výpočet tlakové ztráty „O-elementu“

Tlaková ztráta paralelního potrubí se určí dle teorie, že v každé větvi 4 ramenného „O-elementu“ je stejná tlaková ztráta. Výpočet tedy stačí provést jen pro jednu větev při průtoku, rovnajícímu se čtvrtině celkového vstupního objemu spalin. Výpočet je uveden chronologicky tak, jak proudí spaliny zařízením shora dolů, viz. Obr. 25.



Obr. 25: Popis postupu výpočtu tlakové ztráty

Tlaková ztráta v kolenové tvarovce na vstupu:

Tlakovou ztrátu třením, způsobenou místními odpory, vypočítáme podle vztahu [15]:

$$\Delta P_1 = \zeta_1 \cdot \frac{v_1^2}{2} \cdot \rho_g \quad \{23\}$$

ζ_1 součinitel místních ztrát [-],
 v_1 rychlost proudění spalín potrubím [m/s],
 ρ_g měrná hustota spalín [kg/m³].

Součinitel místních ztrát nalezneme v tabulkách [19]. Rychlost proudění určíme z objemového průtoku spalín a příčného průřezu:

$$v_1 = \frac{V_1}{A_1} \quad \{24\}$$

V_1 objemový průtok spalín [m³/s]
 A_1 plocha příčného průřezu potrubí [m²]

Objemový průtok V_0 [m³_N/s] při normálních podmínkách ($T_0=0^\circ\text{C}$, $p_0=101325\text{Pa}$) přepočítáme pomocí stavové rovnice [21] na podmínky ($T_1=170^\circ\text{C}$, $p_1=103325\text{Pa}$):

$$\frac{p_0 \cdot V_0}{T_0} = \frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} \quad \{25\}$$

potom:

$$V_1 = \frac{V_0 \cdot T_1 \cdot p_0}{T_0 \cdot p_1} \quad \{26\}$$

Tlaková ztráta způsobená zúžením průřezu potrubí (centrickou redukcí):

Pro výpočet použijeme stejný vzorec jako v předchozím případě. Jiná bude pouze hodnota ztrátového součinitele pro centrickou redukci [19].

$$\Delta P_2 = \zeta_2 \cdot \frac{v_2^2}{2} \cdot \rho_g \quad \{27\}$$

ζ_2 součinitel místních ztrát [-]
 v_2 proudění spalín potrubím [m/s],
 ρ_g měrná hustota spalín [kg/m³].

Rychlost proudění v_2 je čtvrtinová oproti vstupní rychlosti v_1 , neboť dojde k rozdělení vstupního objemového průtoku do všech 4 větví „O-elementu“ rovnoměrně, tedy:

$$v_2 = \frac{\frac{V_1}{4}}{A_1} \quad \{28\}$$

Tlaková ztráta způsobená prouděním v přímém potrubí:

Tlakovou ztrátu přímého úseku potrubí vypočítáme podle vztahu [15]:

$$\Delta P_3 = \lambda \cdot \frac{l_1}{d_1} \cdot \frac{v_3^2}{2} \cdot \rho_g \quad \{29\}$$

λ součinitel tření [-],
 l_1 délka přímého úseku potrubí [m],
 d_1 průměr potrubí [m],
 v_3 rychlost proudění [m/s].

Třecí součinitel λ se stanoví pomocí Reynoldsova čísla [-], které charakterizuje typ proudění v potrubí.

$$Re = \frac{v_3 \cdot d_1 \cdot \rho_g}{\eta_g} \quad \{30\}$$

d_1 průměr potrubí [m],
 η_g dynamická viskozita spalín [Pa·s]

Rychlost proudění v_3 určíme z objemového průtoku spalín na vstupu elementu V_1 , který podělíme počtem ramen elementu, a z plochy nového příčného průřezu:

$$v_3 = \frac{\frac{V_1}{4}}{A_2} \quad \{31\}$$

Z vypočítané hodnoty Reynoldsova čísla určíme typ proudění v potrubí a vybereme odpovídající vztah pro určení ztrátového součinitele [15]. Pro hodnotu $Re < 2300$ je proudění laminární, pro $Re > 2300$ je proudění turbulentní. Při turbulentním proudění vypočítáme třecí součinitel pomocí Blasiusovy rovnice [15]:

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad \{32\}$$

Tlaková ztráta způsobená ohyby potrubí (kolena):

$$\Delta P_4 = n_k \cdot \zeta_3 \cdot \frac{v_2^2}{2} \cdot \rho_g \quad \{33\}$$

n_k počet kolen za sebou [-],
 ζ_3 součinitel místního odporu [-] [19],
 v_2 rychlost plynu [m/s],
 ρ_g měrná hustota spalín [kg/m³].

Tlaková ztráta způsobená prouděním dvoufázové směsi:

V dolní části „O-elementu“ dochází k proudění plynu a kapaliny současně. Tlaková ztráta dvoufázového proudění ΔP_{gl} se vypočítá pomocí Lockhart-Martinelliho modulu X_{LM} a Φ [20]. Tento modul přepočítává tlakovou ztrátu vzniklou prouděním samostatného plynu ΔP_G na tlakovou ztrátu vzniklou dvoufázovým prouděním.

$$\Delta P_{gl} = \Delta P_G \cdot \phi^2 \quad \{34\}$$

$$\phi = a \cdot X_{LM}^b \quad \{35\}$$

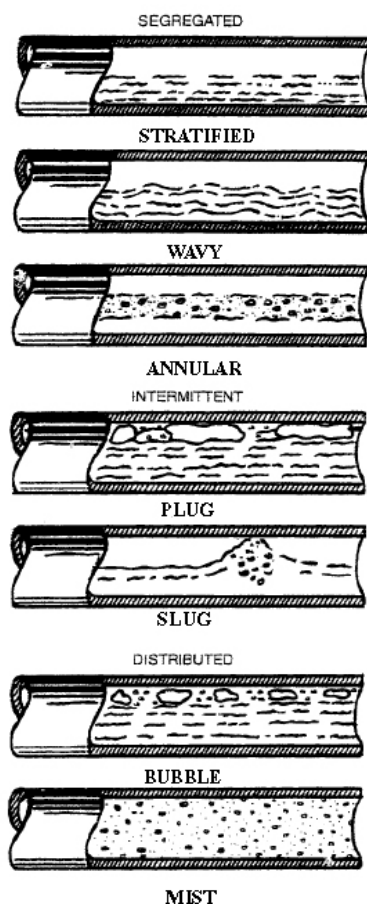
$$X_{LM} = \left(\frac{\Delta P_L}{\Delta P_G} \right)^{0.5} \quad \{36\}$$

a, b koeficienty pro výpočet X_{LM} při disperzním toku [-],
 ΔP_L tlaková ztráta kapaliny, která by vznikla prouděním samotné kapaliny v celém průřezu potrubí,
 ΔP_G tlaková ztráta plynu, která by vznikla prouděním samotného plynu celým průřezem potrubí.

Pro výpočet a, b je nutné znát režim proudění dvoufázové směsi. Směs může horizontálním potrubím proudit v těchto režimech [20]:

- rozděleným tokem (stratified flow),
- vlnovým tokem (wavy flow),
- prstencovým tokem (annular flow),
- zátkovým tokem (plug flow),
- přejevovým tokem (slug flow),
- bublinovým tokem (bubble flow),
- disperzním, mlhovým tokem (dispersed, fog flow, mist).

Obrázek 26 zjednodušeně ukazuje, jak každý z těchto režimů vypadá.



Obr. 26: Možné režimy proudění v horizontálním potrubí [20]

Poznámka k obrázku 26: Segregated – oddělený, Intermittent – nespojitý, Distributed – rozdělený

Rozdělený tok – kapalná fáze proudí v dolní části potrubí a plyn proudí nad kapalinou. Rozhraní fáze kapalina plyn je hladké (hladina zůstává klidná).

Vlnový tok – je podobný rozdělému toku s tím rozdílem, že plyn proudí vyšší rychlostí a tím na hladině kapaliny tvoří vlny, které se šíří ve směru proudění.

Prstencový tok – kapalina proudí po stěnách potrubí, a plyn uprostřed. Plyn s sebou unáší jemně rozptýlené kapičky kapaliny.

Zátkový tok – kapalina proudí téměř v celém průřezu potrubí, v horní části proudí plyn, který vytváří tzv. „zátky“ – útvary někdy až několikanásobně delší než je průměr potrubí. Tyto „zátky“ se různě prolínají na hladině kapaliny.

Peřejový tok – vytváří se, pokud plyn má mnohonásobně vyšší rychlost než kapalina. Rychle proudící plyn periodicky vytváří příčné vlny na kapalině, které se šíří mnohem větší rychlostí než je průměrná rychlost kapaliny. Tyto příčné vlny mohou způsobovat nebezpečné vibrace potrubí.

Bublinový tok – bublinky plynu jsou rozptýleny v kapalině a proudí v horní části potrubí přibližně stejnou rychlostí jako kapalina. Tento typ proudění lze očekávat, pokud je plynu méně než 30% z celkového hmotnostního (objemového) průtoku.

Mlhový tok – kapalina je rozptýlena na malé kapičky v plynu. Směs je homogenní. Tento typ dvoufázového proudění lze očekávat, když je plynu více než cca 30% z celkového hmotnostního toku a při vysokých rychlostech proudění.

Jednou z metod určení režimu proudění je pomocí Bakerova diagramu, který je na obrázku 27. Je třeba vypočítat souřadnice x , y v grafu. Do rovnic dosazujeme v anglosaských jednotkách [20].

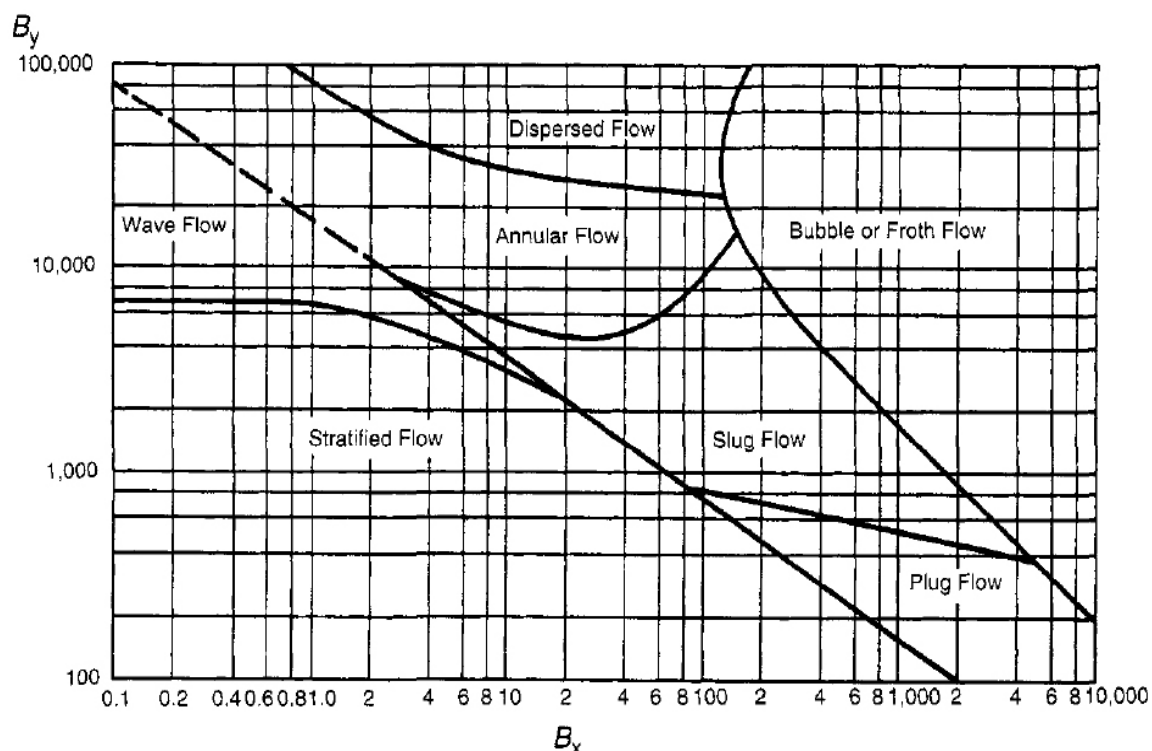
Určení x -ové souřadnice:

$$B_x = 531 \cdot \frac{W_L}{W_G} \cdot \left(\frac{(\rho_L \cdot \rho_G)^{0.5}}{\rho_L^{2/3}} \right) \cdot \left(\frac{\mu_L^{1/3}}{\sigma_L} \right) \quad \{37\}$$

Určení y -ové souřadnice:

$$B_y = 2,16 \cdot \left(\frac{W_G}{A_3} \right) \cdot \frac{1}{(\rho_L \cdot \rho_G)^{0.5}} \quad \{38\}$$

A_3	vnitřní plocha příčného průřezu potrubí [ft ²],
W_L	hmotnostní průtok kapaliny [lb/hod],
W_G	hmotnostní průtok plynu [lb/hod],
ρ_L	hustota kapaliny [lb/ft ³],
ρ_G	hustota plynu [lb/ft ³],
μ_L	dynamická viskozita kapaliny [cP],
σ_L	povrchové napětí kapaliny [dyn/cm].



Obr. 27: Bakerův diagram dvoufázového proudění pro horizontální tok [20].

Ze známého režimu proudění vyplývají vztahy pro výpočet koeficientů Lochart-Martinelliho korelace. „O-element“ byl navrhnut tak, aby proudící kapalina vytvářela co největší difúzní plochu a tím pohlcovala maximální možné množství kyselých složek ze spalín. To se děje v místě styku paprsků proudů a za ním. Za střetem proudů proudí směs disperzním tokem. Do místa setkání paprsků se předpokládá prstencový tok, tedy takový, kdy plyn zaujímá celý průřez potrubí až na jeho osu, v které proudí paprsek kapalina. V příloze_4: Výpočet tlakové ztráty O-elementu, vychází prstencový tok dvoufázového proudění.

Pro koeficienty při prstencovém toku platí následující vztahy [20]:

$$a = 4.8 - 0.3125 \cdot d \quad \{39\}$$

$$b = 0.343 - 0.021 \cdot d \quad \{40\}$$

d vnitřní průměr potrubí [in]

Tlakovou ztrátu plynu ΔP_g vypočítáme součtem jednotlivých ztrát místními odpory při proudění samostatného plynu tímto úsekem potrubím. Pro případ druhé varianty výstupní sestavy „O-elementu“, uvedené v Příloze_1 pod číslem a názvem 003.Sestava spodek 2, se tlaková ztráta samostatně proudícího plynu vypočítá následovně:

Pro rovinné úseky platí vztah {29} a pro centrickou redukci vztah {27}.

Nyní určíme tlakovou ztrátu samostatně proudící kapaliny stejným úsekem (úsekem, kde proudí dvoufázový tok). Vtahy platí stejné, pro rovinné úseky vztah {29} a pro centrickou redukci vztah {27}. Pro jejich úplné určení použijí odpovídající vztahy uvedené výše. Máme-li vypočítané ΔP_G a ΔP_L můžeme určit X_{LM} , Φ a nakonec tlakovou ztrátu dvoufázového proudění ΔP_{gl} .

Poslední částí výpočtu je určení tlakové ztráty vzniklé sražením proudů. [22] uvádí následující postup výpočtu:

Tlaková ztráta sražením proudů odpovídá dynamické složce tlaku, ztrátový součinitel se uvažuje rovný jedné.

$$\Delta P_s = \frac{v_M^2}{2} \cdot \rho_M \quad \{41\}$$

v_M rychlost proudění dvoufázové směsi [m/s],
 ρ_M hustota směsi [kg/m³].

$$v_M = v_g + v_l \quad \{42\}$$

v_g zdánlivá rychlost proudění plynné fáze [m/s]
 v_l zdánlivá rychlost proudění kapalné fáze [m/s]

Zdánlivou rychlost plynné fáze dostaneme, když objemový průtok plynu zvětšený o páru vytvořené z části nástřiku, podělíme plochou průřezu potrubí.

$$v_g = \frac{\dot{V}_g + \frac{\dot{M}_{ODP}}{\rho_g}}{A \cdot n} \quad \{43\}$$

\dot{V}_g objemový průtok spalín [m³/s],
 \dot{M}_{odp} množství odparu, které se vytvoří z nástřiku [kg/s],
 ρ_g hustota plynu [kg/m³],
 A plocha příčného průřezu [m²],
 n počet ramen „O-elementu“.

Zdánlivou rychlost proudění kapaliny v_l získáme zcela obdobně tak, že odpar se od průtoku kapaliny odečítá:

$$v_l = \frac{\dot{V}_L - \frac{\dot{M}_{ODP}}{\rho_l}}{A \cdot n} \quad \{44\}$$

V_L celkový objemový průtok kapaliny O-elementem [m^3/s],
 ρ_l hustota kapaliny [kg/m^3]

Hustotu směsi vypočítáme jako:

$$\rho_M = \frac{\rho_l + \rho_g \cdot x}{1 + x} \quad \{45\}$$

kde:

$$x = \frac{\dot{V}_g + \frac{\dot{M}_{ODP}}{\rho_g}}{\dot{V}_L - \frac{\dot{M}_{ODP}}{\rho_l}} \quad \{46\}$$

Množství odparu z kapaliny (uvažujeme vodu) vypočítáme následovně:

$$\dot{M}_{ODP} = V_{SS} \cdot (x_{V,výst} - x_{V,vst}) \quad \{47\}$$

V_{SS} objemový průtok suchých spalin [m_N^3/s],
 $x_{V,vst}$ vstupní relativní obsah vody vztažený na suché spaliny [kg/m_N^3 suchých spalin],
 $x_{V,výst}$ výstupní relativní obsah vody vztažený na suché spaliny [kg/m_N^3 suchých spalin].

Objemový průtok suchých spalin vypočteme tak, že od celkového průtoku spalin odečteme objem vody obsažený ve spalinách:

$$V_{SS} = V_0 - (V_0 \cdot x_{V,vst}) \quad \{48\}$$

V_0 objemový průtok vstupních spalin [m_N^3/s]

Vstupní relativní obsah vody vztažený na suché spaliny určíme následovně:

$$x_{V,vst} = \frac{c_{V,vst} \cdot MW_{H_2O}}{V_m \cdot (1 - c_{V,vst})} \quad \{49\}$$

$c_{V,vst}$ vstupní objemový zlomek vodní páry ve vstupních spalinách [-],
 MW_{H_2O} střední molekulová hmotnost vody ($MW_{H_2O}=18,02 \text{ kg}/\text{kmol}$),
 V_m molový objem ($V_m=22,4136 \text{ m}_N^3/\text{kmol}$).

Vstupní objemový zlomek vodní páry ve vstupních spalínách určíme pomocí přibližného složení spalín, které bylo experimentálně určeno pomocí programu Chemcad [23].

Výstupní relativní obsah vody vztažený na suché spaliny určíme jako:

$$x_{V,výst} = \frac{c_{V,rovn} \cdot MW_{H_2O}}{V_m \cdot (1 - c_{V,rovn})} \quad \{50\}$$

$c_{V,rovn}$ rovnovážný objemový zlomek vodní páry ve výstupních spalínách [-]

Rovnovážný objemový zlomek vodní páry ve výstupních spalínách určíme jako poměr tlaku nasycených par vody při výstupní teplotě spalín a celkového tlaku spalín:

$$c_{V,rovn} = \frac{p^0}{p} \quad \{51\}$$

p^0 tlak nasycených par při výstupní teplotě spalín [kPa],
 p celkový tlak.

Tlak nasycených par při známé výstupní teplotě $T_{výst}$ určíme pomocí Antoinetovy rovnice:

$$\log(p^0) = A - \frac{B}{C + T_{výst}} \quad \{52\}$$

pro vodu: $A=7,1426$; $B=1715,7$; $C=234,268$. Výstupní teplotu spalín uvažujeme: $T_{výst}=60^\circ\text{C}$.

Celková tlaková ztráta:

Celková tlaková ztráta se vypočítá součtem dílčích ztrát:

$$\Delta P_c = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 + \Delta P_{gl} + 2 \cdot \Delta P_5 \quad \{53\}$$

Tlakovou ztrátu dvoufázového proudění je třeba přičíst dvakrát. Druhá hodnota je nutná na opětovné rozběhnutí směsi po jejím zastavení při sražení proudů. Výpočet tlakové ztráty, pro průtok spalín $700\text{m}_\text{N}^3/\text{hod}$, je uvedený v příloze Příloha_4: Výpočet tlakové ztráty O-elementu.

Vypočítanou tlakovou ztrátu pro průtok spalin 500-1500 m³_N/hod uvádí tabulka 5:

Průtok spalin [m ³ _N /hod]	500	600	700	800	900	1000
Tlaková ztráta [kPa]	1,16	1,49	1,86	2,27	2,70	3,17
Průtok spalin [m ³ _N /hod]	1100	1200	1300	1400	1500	
Tlaková ztráta [kPa]	3,67	4,21	4,78	5,38	6,01	

Tab. 5: Vypočítaná tlaková ztráta

Zhodnocení výpočtu:

Výsledky výpočtu tlakových ztrát vychází dobře. Při vyšších průtocích plynu vychází ztráta poměrně velká, předpokládá se ale, že v těchto režimech se zařízení běžně používat nebude. Výsledky lze částečně srovnat s naměřenými hodnotami uvedenými v literatuře [14]. Průtoky kapaliny do „O – elementu“ se v našem případě pohybovaly okolo 2,5 m³/hod.

Měření pro průtok 700 m³_N/hod u dvouramenného elementu vychází 2 kPa [14]. Výpočet pro stejný průtok vzdušiny pro čtyřramenný element vychází 1,86 kPa. Vzhledem k tomu, že změřená hodnota u dvouramenného elementu je při průtoku absorpční kapaliny 1,89 m³_N/hod, a při výpočtu se předpokládal průtok kapaliny 2,5 m³_N/hod, lze očekávat, že měřená tlaková ztráta u dvouramenného elementu by ještě o trochu narostla, pokud bychom průtok kapaliny zvětšili na 2,5 m³_N/hod. Tento závěr, že vypočítaná tlaková ztráta pro čtyřramenný element vychází vždy nižší, platí i pro ostatní průtoky (800, 900, 1000 m³_N/hod) uvedené v literatuře [14]. Dle měření bylo průtočné množství absorpční kapaliny do „O – elementu“ vždy o něco nižší. Při zvýšení průtoku kapaliny na mez 2,5 m³_N/hod, by tlaková ztráta o trochu narostla.

Přesnost a případně chybu v modelu výpočtu bude nutné ověřit experimentálním měřením.

6. Závěr

Při měřeních na experimentálním zařízení byla zjišťována účinnost odstraňování oxidu siřičitého (SO_2) ze znečištěných spalin. Účinnost zařízení lze nejlépe vyhodnotit podle efektivity odstraňování oxidů síry ze znečištěných spalin, ke kterému bylo zařízení navrženo. Nastavováním různých objemových průtoků spalin, různých průtoků kapalin do obou čistících stupňů a různých vstupních koncentrací oxidů síry, byla měřena jejich výstupní koncentrace v závislosti na pH absorpční kapaliny. Průtok absorpční kapaliny do kolony, lze nastavovat omezeně, neboť při nízkém průtoku nedochází k absorpci škodlivin úplně a naopak při velkém průtoku může dojít k zahlcení náplňové kolony kapalinou a absorpce by probíhala vůbec. „O-element“ se chová podobně. Nastavené průtoky byly tedy zvoleny podle předchozích experimentů tak, aby podmínky absorpce byly co nejlepší. Naměřené hodnoty zpracované do grafů ukazují, že výstupní koncentrace dosahují velmi nízkých hodnot při pH absorpčního roztoku blížícímu se pH 6 - 7. Kyselost roztoku, která by splňovala emisní limit, je velmi závislá na průtoku znečištěné vzdušiny.

Metodika měření je popsána v praktické části práce. Pro zlepšení kontroly se jednotlivé měřicí prvky procesu připojují na zařízení pro zpracování dat (datalab), aby bylo možné monitorovat a řídit proces počítačem. Část zpracovávaných dat už počítač vyhodnocuje - program monitoruje průtoky absorpční kapaliny do obou stupňů čištění a jejich tlakovou ztrátu, teplotu a pH roztoku v nádrži a výstupní koncentraci škodlivin. V budoucnu by bylo možné celý proces plně automatizovat.

Modernizace stávajícího zařízení spočívá v jeho trojrozměrném rozšíření. V návrhu jsou tři různé varianty celků výstupní části, které uvádí Příloha_1. Nejefektivnější se zdá být varianta dle výkresu „Sestava celek 2“, která je uvedena na obrázku 22. U tohoto provedení je největší vnitřní objem výstupního celku ze všech tří uvažovaných variant a tím možnost vytvoření velké mezifázové plochy pro přestup hmoty. Jelikož absorpce probíhá po nástřiku dále ve výstupní rouře, bylo by vhodné, aby roura mezi „O-elementem“ a cirkulační nádrží byla co nejdelší, vzhledem k instalaci, provozním a údržbářským podmínkám zařízení. Proudění nástřikované kapaliny by mělo mířit co nejpresněji proti sobě, aby vznikající dispergovaná kapalina vytvářela co největší objem mlhoviny. Tím by byly zajištěny co nejlepší podmínky absorpce.

7. Použitá literatura

- [1] ČSÚ: Český statistický úřad. [online]. Aktualizováno dne 14.10.2010. [citováno 24. dubna 2010].
Dostupné z: <http://www.czso.cz/csu/2009edicniplan.nsf/p/2001-09>
- [2] Zpráva ČTK: Komunální odpad končí na skládkách, spalovnu mají tři kraje [online]. c2008. Poslední změna: 16. března 2009. [citováno 10. května 2009]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz-bioodpady-a-kompostovani/zpravy-z-tisku/komunalni-odpad-konci-na-skladkach-spalovnu-maji-tri-kraje>
- [3] Klikorka, J., Hájek, B., Votinský, J.: Obecná a organická chemie. 2. nezměněné vydání. Praha. SNTL Nakladatelství technické literatury. 1989.
- [4] Santoleri, J. J., Reynolds, J., Theodore, L.: Introduction to Hazardous Waste Incineration, Second edition. New York. Wiley – Interscience. 2000. ISBN 0-471-01790-6
- [5] MŽP: Těžké kovy a arsen [online]. c2008. [citováno 15. května 2009]. Dostupné z: <http://vitejtenazemi.cenia.cz/vzduch/index.php?article=167>
- [6] MPO: Dokumenty BREF [online]. c2006. [citováno 15. května 2009]. Dostupné z: <http://www.ippc.cz/obsah/viewtopic.php?t=39>
- [7] MŽP: Stockholmská úmluva o perzistentních organických polutantech [online]. [citováno 6. května 2009]. Dostupné z: [http://www.env.cz/AIS/web-ub.nsf/\\$pid/MZPKQF6Y247O](http://www.env.cz/AIS/web-ub.nsf/$pid/MZPKQF6Y247O)
- [8] MŽP: Směrnice pro kvalitu ovzduší v Evropě [online]. c2001. [citováno 8. května 2009]. Dostupné z: http://www.ecmost.cz/ver_cz/ovzdusi/smernice/smernice4.htm
- [9] MŽP: Látka: Poléťavý prach (PM10) [online]. c2005-2008. [citováno 20. dubna 2009]. Dostupné z: http://www.irz.cz/latky/poletavy_prach
- [10] Přehled technologií použitelných ke zneškodňování POPs [online]. c2006. [citováno 15. dubna 2009]. Dostupné z: http://recetox.muni.cz/sources/unido_narodni_inventura_03/POPsINV_cast_VII_Kapitol_a_14_Technologie.pdf
- [11] Metody destrukce chlorovaných aromatických uhlovodíků ze spalín [online]. c2005. [citováno 15. dubna 2009]. Dostupné z: http://oei.fme.vutbr.cz/konfer/biomasa_iv/papers/syc.pdf
- [12] MŽP: Nařízení vlády č.354/2002 Sb. [online]. [citováno 18. dubna 2009]. Dostupné z: <http://www.env.cz/www/platnalegislativa.nsf/d79c09c54250df0dc1256e8900296e32/93f1a79955f5a9e4c125702800361ff8?OpenDocument>

-
- [13] Výroční zpráva [online]. [citováno 21. května 2009]. Dostupné z: <http://www.sako.cz/spolecnost/vyrocnizpravy/>
- [14] Jecha, D.: Absorpční čištění plynů – I. Brno 2006, 77 s., 8 s. příloh. Diplomová práce na FSI VUT v Brně. Vedoucí diplomové práce Doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.
- [15] Šob, F.: Hydromechanika. Brno. Akademické nakladatelství CERM. 2002. ISBN 80-214-2037-5
- [16] MŽP: Oxid siřičitý a částice [online]. c2001. [citováno 22. dubna 2009]. Dostupné z: http://www.ecmost.cz/ver_cz/ovzdusi/smernice/smernice5.htm
- [17] Bravo J.L., Rocha J.A., Fair J.R.: Pressure drop in structured packings. Hydrocarbon Processing. March 1986
- [18] MŽP: Informace o vyhodnocení výsledku imisního monitoringu v roce 2007 [online]. [citováno 26. května 2009]. Dostupné z: [http://www.env.cz/C1257458002F0DC7/cz/kvalita_ovzdusi/\\$FILE/000-Monitoring_2007-20090112.pdf](http://www.env.cz/C1257458002F0DC7/cz/kvalita_ovzdusi/$FILE/000-Monitoring_2007-20090112.pdf)
- [19] Míka V., Neužil L., Vlček J.: Sběrka příkladů z chemického inženýrství. Praha. Nakladatelství SNTL společně s ALFA. 1978. Typové číslo L16-C3-IV-41/67789. První vydání.
- [20] Coker, A.Kayode: Ludwig's applied process design for chemical and petrochemical plants. Forth edition. Elsevier. 2007.
ISBN-13: 978-0-7506-7766-0
ISBN-10: 0-7506-7766-X
- [21] Pavelek M. a kolektiv. Termomechanika. Brno. Akademické nakladatelství CERM. 2003. ISBN 80-214-2409-5
- [22] Bébar L., Lukáš P.: Dvofázové proudění v potrubí, Výzkumná zpráva VÚCHZ Brno, 1975.
- [23] JECHA, D.; DUDEKOVÁ, M.; BÉBAR, L.; STEHLÍK, P. Softwarová podpora výzkumu absorpčního čištění spalin. In /Konferenční CD, 54. konference chemického a procesního inženýrství, CHISA 2007. /Konferenční CD. Srní: ČSCHI, 2007.
- [24] MŽP: Zákon č. 483/2008 Sb. [online]. [citováno 24. března 2010]. Dostupné z: <http://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/d79c09c54250df0dc1256e8900296e32/354aa3c45fd4eb2cc12570280034a881?OpenDocument>
- [25] Jecha David: Osobní předání, Brno, 30.3.2009.
- [26] Obrázek cyklónu. [online]. [citováno 3. března 2010]. Dostupné z: http://www.poziadavka.sk/img_users/ponuky/full/60773_3.gif
- [27] Obrázek látkového filtru. [online]. [citováno 3. března 2010]. Dostupné z:

http://www.airpro.com/images/dustex_twins.jpg

- [28] Obrázek technologie Neutrec. [online]. [citováno 5. března 2010]. Dostupné z: http://www.neutrec.com/process/recycling/0,5330,1614-_EN,00.html
- [29] Obrázek mokrého scrubru. [online]. [citováno 8. března 2010]. Dostupné z: <http://media-2.web.britannica.com/eb-media/00/27100-004-DC341DBD.gif>
- [30] Göteborský protokol. [online]. [citováno 30. Dubna 2010] Dostupné z: <http://www.unece.org/env/lrtap/full%20text/1999%20Multi.E.Amended.2005.pdf>
- [31] Metody destrukce chlorovaných aromatických uhlovodíků ze spalin. [online]. [citováno 30. Dubna 2010]. Dostupné z: http://oei.fme.vutbr.cz/konfer/biomasa_iv/papers/syc.pdf
- [32] Míka V., Neužil L.: Chemické inženýrství 2. 2. vydání. Praha. Vydavatelství VŠCHT. 1997. 305 stran. Číslo publikace 97-203-19/97. ISBN-80-7080-200-4.

SEZNAM PŘÍLOH

- 1) Příloha_1: Dokumentace nového typu experimentálního zařízení „O-elementu“
 1. Centrická redukce 140/70-2
 2. Držák trysky
 3. Koleno DN70 DIN 2605-výřez
 4. Koleno DN100
 5. Koleno DN 76.1
 6. Plochá přivařovací příruba PN10
 7. Příruba DN65 PN16
 8. Příruba DN 100 PN16
 9. Příruba tryska
 10. Trubka 76,1-100
 11. Trubka 76,1 spodek
 12. Trubka 76,1 spodek 3
 13. Trubka 76,1 spodek 1
 14. Trubka 76,1 spodek 1- osazení
 15. Trubka 104
 16. Trubka 104 spodek 3 spodek
 17. Trubka 104 spodek 3-čepica
 18. Trubka 104-vývod
 001. Sestava vršek
 002. Sestava spodek 1
 003. Sestava spodek 2
 004. Sestava spodek 3
 005. Sestava celek 1
 006. Sestava celek 2
 007. Sestava celek 3
- 2) Příloha_2: Technologické schéma
- 3) Příloha_3: Použité přístroje
- 4) Příloha_4: Výpočet tlakové ztráty O-elementu
- 5) Příloha_5: Rozměrová analýza O-elementu